

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Sähkö- ja Tietoliikennetekniikan osasto

Tapio Rautkari

Kalibrointien monikäyttöohjelmisto

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin  
tutkintoa varten Espoossa 08.01.2003

Työn valvoja



Prof. Pekka Wallin

Työn ohjaaja



DI Jyrki Leino

Tekijä:	Tapio Rautkari	
Työn nimi:	Kalibrointien monikäyttöohjelmisto	
Päivämäärä	08.01.2003	Sivumäärä: 73
Osasto:	Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professuuri:	S-108 Mittaustekniikka	
Työn valvoja:	Professori Pekka Wallin	
Työn ohjaaja:	DI Jyrki Leino	
<p>Tässä diplomityössä kehitettiin automaattinen, yleiskäyttöinen ohjelmisto erilaisten mittauslaitteiden kalibrointia varten. Työn tuloksena syntynyt kalibrointiohjelmisto ei ole sidottu mihinkään teknologiaan tai mittausmenetelmiin ja sen avulla voidaan luoda nopeasti kalibroinneissa tarvittavia mittausrutiineja. Ohjausväylänä ohjelmisto voi käyttää GPIB-, VXI-, LAN- tai RS-232C-liitäntää, mutta myös väylättömien mittauslaitteiden kalibrointi on mahdollista.</p> <p>Työn alussa selvitetään yleisiä vaatimuksia kalibrointilaboratoriolle sekä esitellään mittauslaitteiden käytetyimpiä ohjausväyliä. Akkreditoidun kalibrointilaboratorion on noudatettava standardin ISO/IEC 17025 vaatimuksia, joita työssä on pyritty analysoimaan. Työssä vertaillaan automaattisen ja manuaalisen kalibroinnin eroja teoriassa ja käytännössä. Mittauslaitteiden automatisoidussa kalibroinnissa käytettäviä ohjausväyliä ovat standardin IEEE 488 mukainen GPIB-väylä, sarjaliitäntä, VXI-väylä sekä uusimmissa mittauslaitteissa esiintyvät LAN- ja PXI-väylät. Työssä selvitetään näiden väylien tärkeimmät ominaisuudet. Lisäksi työssä esitellään ohjelmiston laatuun liittyviä käsitteitä ja käytännön toimenpiteitä laadukkaan ohjelmiston kehittämiseksi.</p> <p>Kehitetty kalibrointiohjelmisto suunniteltiin käyttäjäkeskeisesti ja sen käytettävyyteen kiinnitettiin erityistä huomiota. Ohjelmisto on luonteeltaan hyvin joustava ja sillä voidaan luoda hyvin erityyppisiä kalibrointirutiineja. Ohjelmiston avulla jokaiselle laitetypille luodaan erillinen ajuri, jota voidaan käyttää kaikissa ohjelmiston avulla tehdyissä mittauksissa. Ajurien avulla laitteiden todelliset väyläkäskyt piilotetaan käyttäjältä ja tällöin käytettävissä on suomenkieliset valikot kaikille ajurissa määritetyille ohjauskäskyille. Ohjelmistolla kalibrointirutiinien tekemiseen kuluva aika on hyvin pieni verrattuna perinteiseen ohjelmointiin. Ohjelmiston avulla kalibrointiin kuluva aika pienenee jopa murto-osaan manuaaliseen mittaukseen verrattuna. Kalibrointiohjelmiston avulla mittautulokset saadaan suoraan Word-muotoiseen kalibrointitodistukseen, joka osaltaan nopeuttaa kalibrointiin kuluvaan aikaan.</p>		
Avainsanat:	Mittausautomaatio, kalibrointi, GPIB, LabVIEW	



Author:	Tapio Rautkari	
Name of the Thesis:	Multicalibration Software	
Date	08.01.2003	Number of Pages: 73
Department:	Department of Electrical and Communications Engineering	
Professorship:	S-108 Mittaustekniikka	
Supervisor:	Professor Pekka Wallin	
Instructor:	MSc Jyrki Leino	
<p>The purpose of this thesis was to develop an automatic calibration platform for different types of measurement instruments. The developed system is not bound to any technology or any measurement method. It can use GPIB-, VXI-, LAN-, or RS-232C-bus as its communication bus, but manual measurements are also possible.</p> <p>In the beginning of the thesis general requirements for the competence of calibration laboratories are explained. Accredited laboratory has to follow the rules of the standard ISO/IEC 17025 which are analyzed in the work. This thesis compares the differences of automatic and manual calibration in theory and in practice. An automated calibration system can use GPIB-bus, serial-bus, VXI-bus and also LAN- and PXI-bus in the latest measurement instruments. The fundamentals of these communication buses are explained. Also the concepts of software quality engineering are discussed and practical methods are described.</p> <p>Developed calibration software was designed to be user centered and usability factors were especially noticed. The software is very flexible and one can create very different types of calibration routines with it. An instrument driver is created for every type of measurement equipment. After this driver can be used in all measurement routines. The actual commands for instruments are hidden from the user and with this method Finnish menus are displayed to the front user. Compared to traditional programming the developed software fastens the development time of calibration routines significantly. Compared to manual measurements also the time spent to calibration is minimized to a fraction. The developed software can save the measurement results directly to a Word-file which also fastens the time spent to calibration.</p>		
Keywords:	Measurement automation, calibration, GPIB, LabVIEW	

## ALKULAUSE

Tämä mittausautomaatioon liittyvä diplomityö tehtiin Nemko Product Services Oy:ssä, Espoossa.

Haluan kiittää työn valvojana toiminutta professori Pekka Wallinia, jolta riitti kaikista kiireistään huolimatta aikaa työni valvomiseen. Kiitokset kuuluvat myös Nemko PS:n yksikönjohtaja Pekka Dahlgrenille ja tekniselle johtajalle Jyrki Leinolle, joiden ansiosta sain diplomityöni tehtyä ja vieläpä jopa aikataulun mukaisesti.

Erityiskiitokset kuuluvat kalibrintipäällikkö Tapio Heinolle, joka on auttanut minua kaikissa mahdollisissa mittausteknisissä kysymyksissä ja pulmissa koko opiskeluaikani.

Espoossa, 08.01.2003



---

Tapio Rautkari

# SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto .....	1
2. Mittauslaitteiden kalibrointi.....	2
2.1. Yleistä .....	2
2.2. Vaatimukset kalibrointilaboratoriolle .....	3
2.2.1. ISO/IEC 17025 .....	3
2.2.2. Mittausten jäljitettävyys.....	5
2.2.3. Muita vaatimuksia .....	7
2.3. Kalibrointitapahtuma .....	9
2.4. Kalibroinnin automatisointi .....	10
2.5. Väyläratkaisut .....	12
2.5.1. Fyysiset mallit.....	12
2.5.2. IEEE 488.....	14
2.5.3. Sarjaliitäntä .....	17
2.5.4. VXI .....	18
2.5.5. PXI.....	23
2.5.6. LAN .....	24
2.5.7. Muut ratkaisut.....	25
3. Ohjelmisto.....	26
3.1. Yleistä .....	26
3.2. LabVIEW .....	26
3.3. SCPI.....	27
3.4. VISA .....	28
3.5. Ohjelmistokehityksen vaiheet.....	29
3.6. Ohjelmiston laatu.....	30
3.6.1. Toiminnallisuus .....	30
3.6.2. Luotettavuus .....	30
3.6.3. Käytettävyys .....	31
3.6.4. Tehokkuus.....	34
3.6.5. Ylläpidettävyys .....	34
3.6.6. Siirrettävyys .....	34
3.6.7. Mitattavat laatuominaisuudet.....	34

3.6.8. Versionhallinta.....	35
3.7. Ohjelmiston testaus ja validointi .....	35
4. Kalibrointiohjelma.....	37
4.1. Vaatimukset .....	37
4.1.1. Toiminnalliset vaatimukset.....	37
4.1.2. Ei-toiminnalliset vaatimukset .....	39
4.2. Ohjelman rakenne .....	40
4.2.1. DUT-info .....	41
4.2.2. Hakemistojen asetukset .....	43
4.2.3. Väylän asetukset .....	44
4.2.4. Kalibrointien asetukset .....	51
4.2.5. Kalibrointi.....	59
4.3. Esimerkki kalibrointiohjelmasta: HP 33120A.....	63
4.4. Ohjelmiston validointi .....	65
4.5. Ohjelmiston käytettävyys .....	69
5. Johtopäätökset.....	71
6. Lähdeluettelo .....	72

Liite 1	Kalibrointiohjelmiston aliohjelmat
Liite 2	Matemaattiset funktiot
Liite 3	Väyläasetustiedosto funktiogeneraattorille HP 33120A
Liite 4	Funktiogeneraattorin HP 33120A taajuusriippuvuusmittauksessa tarvittavat tiedostot
Liite 5	Funktiogeneraattorin HP 33120A kalibroinnin tuloksena syntynyt kalibrointitodistus



## LYHENTEET

ANSI	American National Standards Institute Yhdysvaltain kansallinen standardisointi-instituutti
ASCII	American Standard Code for Information Interchange Anglosaksisen kirjain- ja erikoismerkistön numerokoodit määrittelevä standardi.
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures Kansainvälinen paino- ja mittatoimisto
CGPM	Conférence Générale des Poids et Mesures Yleinen paino- ja mittakonferenssi
CIPM	Comité International des Poids et Mesures Kansainvälinen paino- ja mittakomitea
CCITT	Comite Consultatif Internationale de Telegraphique et Telephonique Tietoliikennealueen standardointiorganisaatio
DAQ	Data Acquisition Tiedonkeruu, tietokonepohjainen mittauslaite
DUT	Device Under Test Testattavana tai kalibroitavana oleva laite
EIA	Electronic Industries Alliance Elektroniikkateollisuuden yhteistyöjärjestö Yhdysvalloissa
ESD	Electrostatic Discharge Staattisen sähköön purkaus
GPIB	General Purpose Interface Bus IEEE 488.1-väylän kaupallinen nimi
HP-IB	Hewlett Packard Interface Bus IEEE 488.1-väylän kaupallinen nimi
IEC	International Electrotechnical Commission Sähköalan kansainvälinen standardisoimisjärjestö
ISO	International Organization for Standardization Kansallisten standardointiorganisaatioiden perustama vapaaehtoinen yhteistyöelin
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers Sähköalan ammattihenkilöiden yhdistys

---

KML	Kansallinen Mittanormaalilaboratorio Ylläpitää kansallista mittanormaalia ja sen jäljitettävyyttä
LAN	Local Area Network Lähiverkko
MRA	Mutual Recognition Agreement Monenkeskinen tunnustamissopimus
MTBF	Mean Time Between Failures Keskimääräinen aika vikojen välillä
MTTF	Mean Time to Failure Keskimääräinen vikaantumisaika
MTTR	Mean Time To Repair Keskimääräinen toipumisaika vikatilanteesta
MXI	Multisystem Extension Interface Bus Nopea rinnakkaismuotoinen väylä VXI:n ulkoisille liitännöille
NPL	National Physics Laboratory Iso-Britannian kansallinen mittanormaalilaboratorio
PCI	Peripheral Component Interconnect Tietokoneen sisäinen tiedonsiirtoväylä
PXI	PCI Extensions for Instrumentation Tietokoneen PCI-väylään perustuva mittauslaitearkkitehtuuri
SCPI	Standard Commands for Programmable Instruments Ohjelmointikieli, joka helpottaa mittauslaitteiden ohjaamista
SCXI	Signal Conditioning Extensions for Instrumentation Moduulipohjainen signaalinmuokkausarkkitehtuuri
USB	Universal Serial Bus Sarjamuotoinen tiedonsiirtoväylä PC-tietokoneissa
UUT	Unit Under Test Testattavana tai kalibroitavana oleva laite tai yksikkö
VISA	Virtual Instrumentation Software Architecture Ohjelmoinnin rajapinta, joka piilottaa eri väylien tyypit
VME	Versa-Module Europa Modulaarinen mittauslaitearkkitehtuuri
VXI	VMEbus Extensions for Instrumentation VME:stä kehitetty modulaarinen mittauslaitearkkitehtuuri

# 1. JOHDANTO

Mittauslaitteiden kalibrointi perinteisillä menetelmillä on usein rutiininomaista ja aikaa vievää työtä. Teollisuusalan kilpailu asettaa kuitenkin melkoisia ajallisia vaatimuksia mittauslaitteiden kalibrointeja suorittaville yrityksille. Mittauslaitteiden puuttuminen tuotantolinjalta saattaa aiheuttaa jopa tuotantokatkoksen, ellei korvaavia mittauslaitteita ole käytettävissä. Tämän vuoksi kalibrointilaboratorioiden on parhaimman kykynsä mukaan pyrittävä lyhyisiin toimitusaikoihin. Mittausautomaatio on merkittävä keino pienentää kalibrointiin kuluva aikaa. Kaikkien laitteiden kalibrointia ei voida tai edes kannata automatisoida, mutta varsinkin suurtaajuisten mittauslaitteiden kalibroinnin automatisointi kannattaa lähes aina. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu yleensä ohjelmiston kehitykseen kuluva aika.

Tämä diplomityö tehtiin Nemko Product Services Oy:ssä, jolla on pitkä kokemus mittauslaitteiden kalibroinneista ja huollosta. Yritys on toiminut kansallisena mittanormaallilaboratoriona suurtaajuisille suureille vuosina 1985-1998 sekä akustisille suureille 1992-1998. Vuosien varrella Nemko PS:lle on kertynyt monenlaisia kalibrointiohjelmistoja, joiden toimintaa tämän työn kautta haluttiin yhtenäistää. Osa ohjelmista on kehitetty Hewlett-Packardin kehittämällä HP Basic -kielellä ja osa National Instrumentsin LabVIEW:llä eikä niitä voida käytännössä ajaa samalla tietokoneella. Varsinkin HP Basic -pohjaisten ohjelmistojen muuttaminen nykyaikaisiksi osoittautui hyvin vaikeaksi tehtäväksi.

Työn tavoitteena oli kehittää kalibrointiohjelmisto, jonka avulla pystyttäisiin kalibroimaan mahdollisimman paljon erityyppisiä mittauslaitteita. Haasteena oli, ettei ohjelmisto olisi rajoittunut mihinkään teknologiaan tai mittauslaiteryhmään. Ohjelmiston haluttiin myös automatisoivan mittauksen pohjalta syntyvän kalibrointitodistuksen tekemistä. Ohjelmistolle asetettiin tavoitteeksi myös korkea käytettävyyssaste, joten ohjelmisto suunniteltiin käyttäjäkeskeisesti.

Kehitetyn ohjelmiston avulla mittauslaitteiden ohjaaminen tapahtuu laitteissa olevan ohjausväylän kautta. Kalibrointiohjelmistossa on mahdollisuus käyttää GPIB-, VXI-, LAN- ja RS-232C-väyliä, jotka ovat tämän hetken suosituimpia ohjausväyliä mittauslaitteissa. Kalibroinneissa käytettävien mittauslaitteiden asetuksien perusteella luodaan kullekin erityinen ajuri, joka sisältää tiedot väylästä, sen asetuksista ja tarpeellisista väyläkäskyistä. Tätä ajuria voidaan käyttää kaikkien kalibrointien erilaisissa mittauksissa, joten käskyjen kirjoittaminen tehdään vain yhden kerran. Samalle ajuriin määritellään väyläkäskyjen suomenkieliset vastineet, jotka kalibrointien asetuksissa näytetään yhtenäisenä valikkona. Kalibrointiin voidaan valita mielivaltainen määrä näitä laiteajureita.

Esimerkkinä kalibroinnista työssä rakennettiin kalibrointiohjelma Hewlett-Packardin funktiogeneraattorille 33120A. Työ sisältää laitteen kalibroinnissa tarvittun laiteajurin ja kalibrointien asetukset. Laatustandardin ISO/IEC 17025 mukaisesti ohjelmiston toiminta validoitiin, jonka tulokset esitellään työn lopussa.



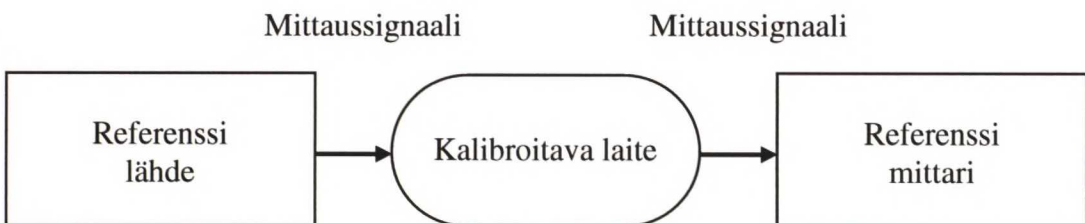
## 2. MITTAUSLAITTEIDEN KALIBROINTI

### 2.1. Yleistä

Mittausvirheet johtuvat usein mittauslaitteen epäideaalisista ominaisuuksista, joita ovat mm. sen epätarkkuus, lineaarisuus ja stabiilisuus. Lisäksi mittauslaite voi kuormittaa mitattavaa kohdetta, jolloin syntyy lisää mittausvirhettä. Myös ympäristön häiriöt voivat vaikuttaa mittautulokseen ja inhimilliset virheet ovat aina mahdollisia, koska mittautulos voidaan esimerkiksi lukea mittauslaitteen näytöltä väärin. Satunnaisvirheen määrää voidaan vähentää keskiarvoistamalla mittautuloksia, mutta systemaattisten virheiden havaitsemiseen ja korjaamiseen tarvitaan muita toimenpiteitä. Kalibrointi pyrkii selvittämään systemaattisen virheen määrän ja antamaan mittauslaitteen käytölle enemmän luotettavuutta. Kansainväliset laatustandardit vaativat niitä noudattavia yrityksiä varmistamaan tuotteidensa laadukkuuden. Jos tuotannossa käytetään mittauslaitteita, tulee niiden antamien mittautulosten oikeellisuudesta varmentua. Laadunvarmistus voidaan tällöin hoitaa kalibroimalla yrityksen mittauslaitteet jossain pätevässä kalibrointilaboratoriossa.

Mittauslaitteiden kalibrointi on yksinkertaisuudessaan mitattavan laitteen suureiden vertailua tunnettuihin referenssiarvoihin. Referenssisuureiden arvot eivät ole absoluuttisesti oikeita, mutta niiden poikkeaman todennäköisyys oikeasta arvosta on pienempi kuin kalibroinnin kohteena olevan laitteen [1]. Kalibroinnilla varmistetaan yleensä myös laitteiden toimintatarkkuus, jonka valmistaja on yleensä spesifioinut. Kalibroinnin avulla voidaan pienentää mittausepävarmuutta merkittävästi, varsinkin jos kalibroinnin tuloksia käytetään korjaamaan mittauslaitteen näyttämää. Tällöin korjausarvot on kuitenkin saatava tarpeeksi suurelta alueelta, jotta niihin voitaisiin luottaa. Kalibrointi käsitteenä ei pidä sisällään laitteen säätämistä, jos se ei täytä spesifikaatioita, mutta tarvittaessa näin voidaan tehdä.

Kalibroitava mittauslaite (DUT, UUT) voi olla signaalia generoiva laite, signaalia analysoiva laite tai signaalia muokkaava laite. Esimerkkejä tällaisista laitteista ovat mm. funktiogeneraattori, yleismittari ja vaimennin. Signaalia generoiva laite kalibroidaan referenssimittarilla, signaalia analysoiva laite kalibroidaan referenssilähteellä ja signaalia muokkaava laite näillä molemmilla. Kalibrointi voidaan esittää pelkistetyksi kuvan 2.1 esittämällä tavalla. Kalibroitavasta laitteesta riippuen referenssilähdettä tai referenssimittaria ei tarvita.



**Kuva 2.1** Mittauslaitteen kalibrointi



## **2.2. Vaatimukset kalibrointilaboratoriolle**

### **2.2.1. ISO/IEC 17025**

Standardi ISO/IEC 17025 [2,3] määrittelee vaatimukset kalibrointilaboratorioiden pätevyydelle. Standardi on samalla vaatimuksena akkreditoidun kalibrointilaboratorion toiminnalle [4]. Lisäksi akkreditoidun kalibrointilaboratorion on noudatettava epävarmuuslaskelmissa julkaisun EA-4/02 [5] ohjeita. Noudattaessaan standardin vaatimuksia laboratorio täyttää myös laatustandardien ISO 9001 ja ISO 9002 vaatimukset.

Standardin ISO/IEC 17025 hallinnollisissa vaatimuksissa kuvataan organisaation ja laatujärjestelmän vaatimukset, menettelyohjeet asiakirjojen valvonnalle sekä yleisohjeistus tarjouspyyntöjen, tarjousten ja sopimusten katselmusten suorittamiseksi. Kalibrointien suorittaminen alihankkijoiden avulla on mahdollista, mutta kalibrointilaboratorio on vastuussa työstä ja työn laadusta. Lisäksi asiakasta on informoitava alihankkijan käytöstä. Asiakasyhteistyön merkitystä korostetaan standardin monessa muussakin kohdassa. Asiakaspalautetta, negatiivista ja positiivista, on kerättävä, arkistoitava ja sitä on hyödynnettävä palvelun kehittämisessä.

Standardin mukaan kalibrointilaboratoriolla on oltava menettely poikkeavan työn tunnistamiseksi, hallitsemiseksi ja korjaamiseksi. Poikkeavan työn tuloksia ovat mm. virheelliset kalibrointitulokset, jotka johtuvat mittauslaitteen viallisuudesta. Korjaavia toimenpiteitä ovat syyn analysointi, vaikutusten arviointi ja seuranta. Ehkäiseviä toimenpiteitä tarvitaan, jotta virheitä ja korjattavaa ei syntyisi.

Toiminnan tuloksena syntyvien tiedostojen valvonnasta on huolehdittava. Laboratoriolla on oltava menetelmät niiden tunnistamiseen, kokoamiseen, luettelointiin, saatavuuteen, kirjaamiseen, arkistointiin, ylläpitoon ja hävittämiseen. Tällaisia tiedostoja ovat kaikki laatutiedostot, tekniset tiedostot, laatuauditointitiedostot, laadunvarmennustiedostot ja tiedostot johdon katselmuksista. Tärkeätä on, että toiminta oleellisilta osiltaan on dokumentoitu huolella. Tiedostot voivat olla missä muodossa vain, sähköisessä muodossa tai paperikopioina.

Jotta laatujärjestelmän ja standardin vaatimusten täyttäminen voitaisiin varmistaa, tarvitaan sisäisiä auditointeja säännöllisesti ennalta suunnitellun aikataulun mukaisesti. Auditoinnin täytyy olla pätevä ja koulutettu tehtävänsä sekä riippumaton auditoitavasta toiminnasta. Auditoinnin tulokset kirjataan auditointitiedostoihin ja mahdollisista jatkotoimenpiteistä sovitaan auditoinnin yhteydessä.

Sisäisten auditointien lisäksi tarvitaan johdon katselmuksia, joissa selvitetään onko toiminta sopivaa ja tehokasta ja tarvitaanko muutoksia tai parannuksia. Johdon katselmuksia tehdään ennalta määritellyn menettelyn ja aikataulun mukaisesti. Siihen tulee sisältyä palautteen, poikkeamien, korjaavien ja ehkäisevien toimenpiteiden sekä sisäisten auditointien tulosten käsittely. Lisäksi katselmuksissa käsitellään ulkopuolisten vertailumittauksien tuloksia.

Standardin teknisissä vaatimuksissa kuvataan henkilöstölle asetettuja edellytyksiä. Henkilökunnan täytyy olla pätevöitynyt työhönsä ja siihen valmistavan koulutuksen tulee olla valvottua ja suunnitelmallista. Kalibrointilaboratorio voi käyttää vakituista henkilökuntaa tai sopimuspohjaista henkilökuntaa asiakastöihin, kunhan henkilöiden pätevyydestä on huolehdittu. Työntekijöillä tulee olla selvät toimenkuvat, jotka ovat dokumentoitu. Johdon tulee valtuuttaa henkilöstö erilaisiin tehtäviin, kuten näytteenotto, kalibrointi, todistusten laadinta sekä mielipiteiden ja tulkintojen antaminen. Henkilöstön pätevyyksistä ja oikeuksista on pidettävä tiedostoa, johon on merkittävä voimaantulopäivämäärät.

Tilojen ja ympäristön tulee olla sellaiset, että kalibrointien suoritus oikealla tavalla on mahdollista. Ympäristöolosuhteet eivät saa vaikuttaa mittaustuloksiin. Kalibrointitoiminnassa varsinkin lämpötilalla, kosteudella ja sähkömagneettisen säteilyn voimakkuudella voi olla vaikutusta tuloksiin. Näiden mahdollisiksi virhelähteiksi arvioitujen suureiden vaatimukset on dokumentoitava ja niitä on seurattava. Työskentelytilojen kulunvalvontaan pitää kiinnittää huomiota.

Kalibrointilaboratorion käyttämien kalibrointimenetelmien ja muiden menetelmien tulee olla validoituja, eli oikeaksi vahvistettuja. Menetelmistä täytyy olla tarkat kuvaukset, joiden täytyy kattaa kaikki kalibrointivaiheet. Kalibrointimenetelminä suositellaan käytettäväksi kansainvälisesti standardoituja menetelmiä. Jos laboratorio aikoo käyttää muita menetelmiä, täytyy ne validoida asianmukaisesti ja validoinnin tulokset säilyttää. Standardi esittelee erilaisia tapoja varmistaa menetelmien toimivuus. Kalibrointilaboratoriolla on lisäksi oltava menetelmät mittauserävarmuuden laskemiseksi kaikille erityyppisille kalibroinneille. Epävarmuuksien arvioinnin täsmällisyyden tarve riippuu mm. menetelmän ja asiakkaan asettamista vaatimuksista.

Mittausautomaatiossa käytettävien ohjelmien täytyy olla validoituja ja tarpeeksi hyvin dokumentoituja. Tavallisia kaupallisia ohjelmistoja ei tarvitse validoida, sillä niiden oletetaan olevan riittävän hyvin validoituja. Mittaustuloksia säilyttävien tietokoneiden informaation eheydestä ja luottamuksellisuudesta on huolehdittava esimerkiksi varmuuskopioilla ja salasanoilla. Tietokoneiden ylläpidosta on huolehdittava, jotta niiden oikea toiminta voitaisiin taata.

Kalibroinnissa käytettävien laitteiden ja ohjelmistojen tulee olla sellaisia, että niillä saavutetaan mittauksissa tarvittava tarkkuus. Mittauslaitteiden tulee olla kalibroituja ennalta suunnitellun kalibrointiohjelman mukaisesti. Mittauslaitteistoa saavat käyttää siihen pätevöityneet työntekijät. Laitteiston ja ohjelmiston tiedoista on pidettävä rekisteriä, josta käy ilmi kunkin yksilön tarkat tiedot. Vialliset mittauslaitteet on merkittävä ja pidettävä selvästi erossa muista laitteista sekä niiden vaikutus mittaustuloksiin pitää selvittää. Mittauslaitteissa tulee olla kalibrointimerkintä tai kalibrointitarra, joka ilmaisee edellisen ja seuraavan kalibroinnin ajankohdan. Laboratoriossa tulee olla menetelmät kalibrointituloksissa saatujen korjauskertoimien päivittämiseksi mittauslaitteisiin ja ohjelmistoihin. Lisäksi mittauslaitteissa ja ohjelmistoissa täytyy olla estot sellaiseen säätämiseen, joka mitätöi kalibrointitulokset.

Kaikkien kalibroinneissa sekä ympäristöolosuhteiden mittauksessa käytettävien mittauslaitteiden tulee olla kalibroituja ennen käyttöönottoa. Kalibrointien tulee olla jäljitettyjä SI-yksiköihin, mikäli tämä on mahdollista.



Standardin mukaan kalibrointilaboratoriolla pitää olla menetelmät kalibroitavien laitteiden kuljettamiselle, vastaanottamiselle, käsittelylle, suojaamiselle ja varastoimiselle. Kalibroitavat laitteet tulee yksilöidä tunnistemerkinnoilla, jotta ne eivät sekoittuisi muihin laitteisiin. Kalibroitavia mittauslaitteita vastaanotettaessa mahdolliset poikkeamat normaalista toiminnasta tulee kirjata.

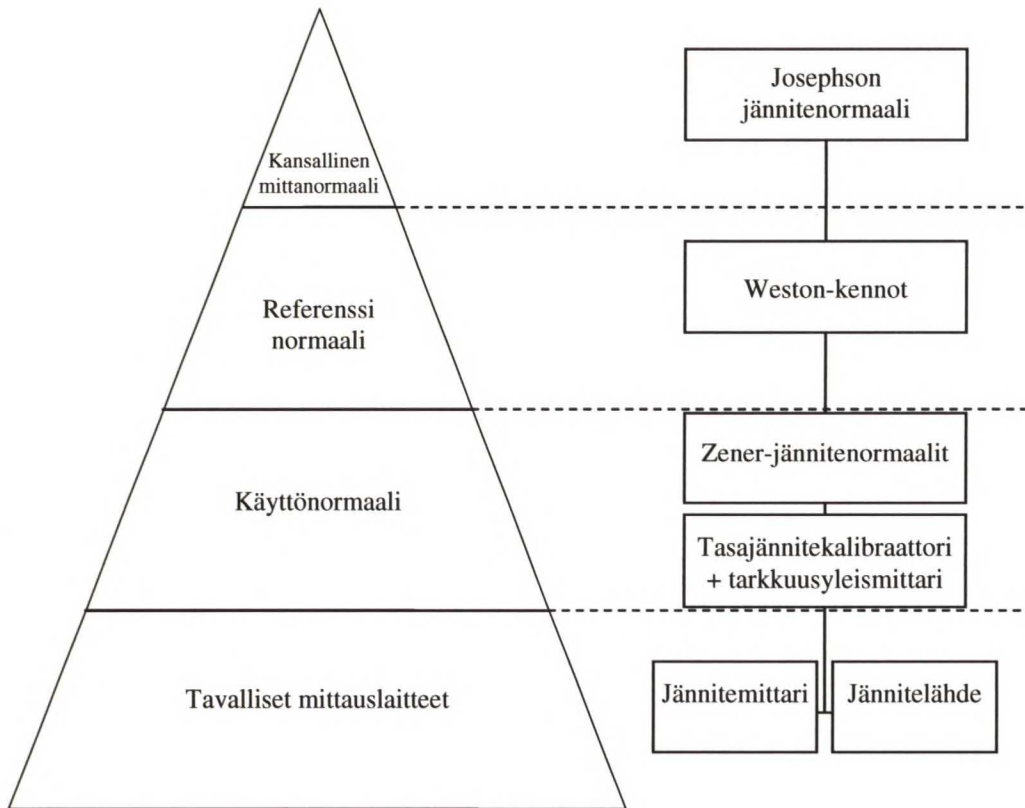
Laadunvarmistusmenetelmistä mainitaan referenssimateriaalin säännöllinen käyttö, osallistuminen laboratorioden välisiin vertailuihin, sisäiset vertailumittaukset, uusintakalibroinnit ja laitteiden eri ominaisuuksien välisen korrelaation selvittäminen. Laadunvarmistusmenetelmät takaavat kalibrointitulosten laadun ja oikeellisuuden, joten niiden käyttäminen on laboratorion oman edun mukaista. Menetelmien käyttö tulee olla suunnitelmallista ja tulokset on kirjattava siten, että tulosten kehityssuunnat ovat nähtävissä.

Standardi sisältää vähimmäisvaatimukset kalibrointitodistusten laatimiseksi. Todistusten sisällön tulee olla esitetty täsmällisesti, selkeästi, yksiselitteisesti ja puolueettomasti. Pääasiassa todistuksen tulee sisältää asiakkaan tarvitsemat tiedot sekä tiedot todistuksen oikeaan tulkitsemiseen. Yleisten tietojen ja mittaus tulosten lisäksi kalibrointitodistuksessa pitää olla tiedot kalibroinnin ympäristöolosuhteista, mittausepävarmuudesta ja mittausten jäljitettävyydestä. Jos todistus sisältää tulkintoja tai mielipiteitä esimerkiksi vaatimustentäytymisestä, on niiden perustelut ilmoitettava. Alihankkijan tekemistä kalibroinneista on ilmoitettava todistuksessa. Jos todistus siirretään sähköisessä muodossa asiakkaalle, on sen täytettävä samat standardin vaatimukset.

### 2.2.2. Mittausten jäljitettävyys

ISO/IEC 17025 vaatii kalibrointilaboratoriota tekemään kaikki kalibroinnit jäljitettävästi SI-yksiköihin. Jäljitettävyys voidaan varmistaa kalibroimalla ainakin laboratorion referenssimittauslaitteet jossain toisessa pätevässä kalibrointilaboratoriossa. Jotta mittaus tulokset olisivat epävarmuudeltaan pienempiä kuin kalibrointilaboratorion omat epävarmuudet, kannattaa kalibroinnit suorittaa jossain kansallisessa mittanormaallilaboratoriossa (KML). Joitain suureita ei voida tällä hetkellä kalibroida Suomessa KML-tasoisesti, joten niiden kalibrointi täytyy suorittaa ulkomaisissa kalibrointilaboratorioissa. Jos jäljitettävyyttä ei voida saavuttaa SI-yksiköihin, voidaan käyttää muita menetelmiä, kuten sertifioituja referenssiaineita tai laboratorioden välisiä vertailuja [2].

Standardit EA-4/07 [6] ja ILAC-G2:1994 [7] esittävät menettelytapoja jäljitettävyysvaatimusten saavuttamiseksi. Niiden mukaan jäljitettävyys on usean osatekijän summa: vertailujen katkeamaton ketju, mittausepävarmuusketju, dokumentointi, kilpailukyky, SI-yksiköiden referenssi ja kalibrointien toisto. Standardit jakavat koko kalibrointihierarkian neljään eri tasoon, joita ovat kansainvälinen taso, kansalliset metrologian instituutit, akkreditoitut kalibrointilaboratoriot ja yritysten sisäiset kalibrointilaboratoriot. Hierarkiassa voidaan erottaa useita eri tasoisia referenssinormaaleja, jotka alkavat SI-yksiköiden realisoinnista ja päättyvät yritysten käyttämiin käyttönormaaleihin.

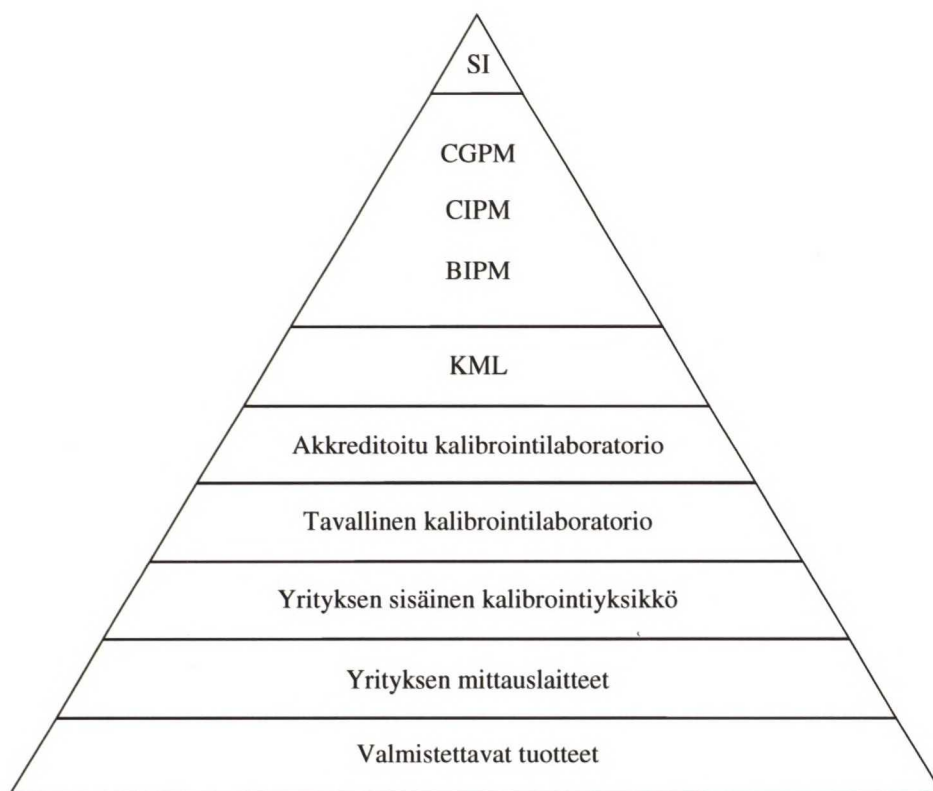


**Kuva 2.2** Tasajännitteen kalibroitihierarkia [7]

Mittatekniikan Keskus (MIKES) ylläpitää ja kehittää kansallista mittanormaalijärjestelmää ja vastaa SI-yksikköjärjestelmän toteuttamisesta Suomessa. Kansalliset mittanormaalit saattavat olla ns. primäärinormaaleja, jotka ovat realisoitu suoraan niiden määritelmästä. Tällöin laite on metrologisilta ominaisuuksiltaan paras mahdollinen mittanormaali, jonka tarkkuutta ylläpidetään kansainvälisillä vertailumittauksilla vastaavanlaisiin primäärinormaaleihin. MIKES on yhteistyössä kansainvälisten metrisopimukseen perustuvien organisaatioiden kanssa ja kehittää osaltaan SI-järjestelmää. Tärkeimpiä kansainvälisiä organisaatioita ovat BIPM (kansainvälinen paino- ja mittatoimisto), joka ylläpitää perustavaa laatua olevia mittanormaaleita ja koordinoi kansainvälisiä vertailumittauksia, CIPM (kansainvälinen paino- ja mittakomitea), joka valvoo ja ohjaa BIPM:n toimintaa sekä CGPM (yleinen paino- ja mittakonferenssi), joka on metrisopimuksen ylin päättävä elin. MIKES lisäksi on mukana kansainvälisessä ekvivalenssisopimuksessa (MRA), jonka piirissä olevat kansalliset mittanormaalilaboratoriot tunnustavat toistensa antamat kalibrointitodistukset tasavertaisiksi.

Esimerkkinä jäljitettävyyshierarkia on kuvan 2.2 tasajännitteen kalibroitihierarkia. Tasajännitteen kansallinen jälki saadaan Suomessa Mittatekniikan Keskuksesta CIPM:n suosituksen [8] mukaisesta Josephson-primäärijännitenormaalista, josta voltti siirretään sekundäärinormaaleina toimiviin Weston-kennoihin. Käyttönormaaleina toimivat Zener-jännitenormaalit, joista jälki johdetaan kalibraattoreihin ja tarkkuusyleismittareihin.[9]





**Kuva 2.3** Jäljitettävyys SI-yksiköistä valmistettaviin tuotteisiin [7]

Kansainvälisellä tasolla SI-mittayksikköjärjestelmän realisointi tapahtuu CGPM:n päätöksen perusteella, jonka alaisia CIPM ja BIPM ovat. Kansalliset mittanormaalilaboratoriot ovat yleensä valtioiden korkeimpia toimielimiä metrologiassa ja ne ylläpitävät kansallista jälkeä tiettyihin SI-yksiköihin. Akkreditoidut kalibrointilaboratoriot ovat jonkin kansainvälisesti hyväksytyn akkreditointielimen päteviksi toteamia laboratorioita. Suomessa akkreditointipalvelua tarjoaa Mittatekniikan Keskus FINAS (The Finnish Accreditation Service). Muiden kalibrointilaboratorioiden pätevyyttä ei ole virallisesti todennettu puolueettomalla osapuolella, mutta niiden laatujärjestelmät saattavat olla täysin kunnossa kalibroitien suorittamista varten. Varsinkin suuremmilla yrityksillä saattaa olla oma kalibrointiyksikkö, joka suorittaa yrityksen omien mittauslaitteiden kalibroinnin sisäisesti. Kalibrointihierarkian pohjalla saattaa olla jokin tuotantolinjan ominaisuuksia mittaava sensori, joka on kalibroitu jollain tarkemmalla mittauslaitteella. Jäljitettävyys SI-yksiköistä alaspäin aina valmistettaviin tuotteisiin on esitetty kuvassa 2.3.

### 2.2.3. Muita vaatimuksia

ISO/IEC 17025 jättää useita vaatimuksia kalibrointilaboratoriolle hieman avonaisiksi, joten laboratoriot saavat itse päättää yksityiskohtien toteutuksesta. Standardi onkin tarkoitettu melko yleisluontoiseksi, sillä kaikkia kalibrointi- ja testauslaboratorioita koskevia tiukkoja sääntöjä on mahdotonta määritellä.

Kalibrointilaboratorion ympäristöolosuhteista lämpötilalla on yleensä suurin merkitys mittauksille, varsinkin kun suoritetaan sähköisiä kalibrointeja.

Lämpötila vaikuttaa mm. vastuksien resistanssien suuruuteen, jolloin vaikutus näkyy Ohmin lain mukaisesti myös virrassa tai jännitteessä. Lämpötilan ohjeellisesta arvosta löytyy useitakin eri standardeja, sähköisiä kalibrointejä suorittaville laboratorioille suositellaan lämpötilaa  $+23\text{ °C}$  tai  $+25\text{ °C}$  [1]. Lämpötilan vaihtelut on lisäksi pyrittävä pitämään minimissä ja niitä on seurattava, jotta mittaustulokset eivät vaihtelisi ajan suhteen. Hyväksyttävät vaihtelurajat riippuvat täysin laboratorion tarkkuusvaatimuksista, esimerkiksi raja  $\pm 1\text{ °C}$  voi olla täysin riittävä.

Suhteellisen kosteuden seuranta ja ylläpito on myös tärkeää, sillä alle 20 % suhteellinen kosteus tuo esiin staattisen sähkön ongelmat ja yli 70 % suhteellinen kosteus saattaa aiheuttaa mittausrvirheitä. Yleisesti on hyväksytty arvo  $45 \pm 10\%$ . Suhteellisen kosteuden vaihtelun vaikutus näkyy varsinkin suurohmisissa referenssivastuksissa. [1]

Lämpötilan ja kosteuden säätö on myös tärkeätä työviihtyvyyden takaamiseksi. Ilmastointia suunniteltaessa tulee ottaa huomioon mm. valaistuksen, mittauslaitteiston ja henkilöstön tuoma lämpökuorma sekä lämmön epätasainen jakautuminen laboratoriotilaan.

Muita huomioonotettavia ympäristötekijöitä ovat käyttöjännitteen tasaisuus, suojautuminen staattiselta sähköltä ja sähkömagneettiselta säteilyltä. Käyttöjännitteen amplitudia voidaan tasata erillisillä muuntajilla ja kriittisimpien referenssilaitteiden ja mittaustietokoneiden sähkönsyöttö voidaan taata UPS-laitteilla. Staattisen sähkön aiheuttamia ongelmia voidaan välttää, kun suhteellinen kosteus pidetään tarpeeksi suurena [10,11,12]. Puolijohtavat lattia- ja työpinnat tulee yhdistää ESD-maahan ja henkilöstön tulisi käyttää ESD-jalkineita sekä tarvittaessa maadoitusrannekkeita [10,12]. Kalibrointilaboratorion rakenteisiin voidaan käyttää sähköä johtavia materiaaleja, jolloin muodostuu Faradayn häkki, joka suojaa ulkopuoliselta sähkömagneettiselta säteilyltä ainakin jonkin verran. Laboratorion henkilökunnan on myös huolehdittava etteivät matkapuhelimet häiritse herkkiä mittauksia. Ympäristötekijöiden arvojen valintaa opastetaan suosituksissa ISA RP52.1 ja NCSL RP-7 [1].

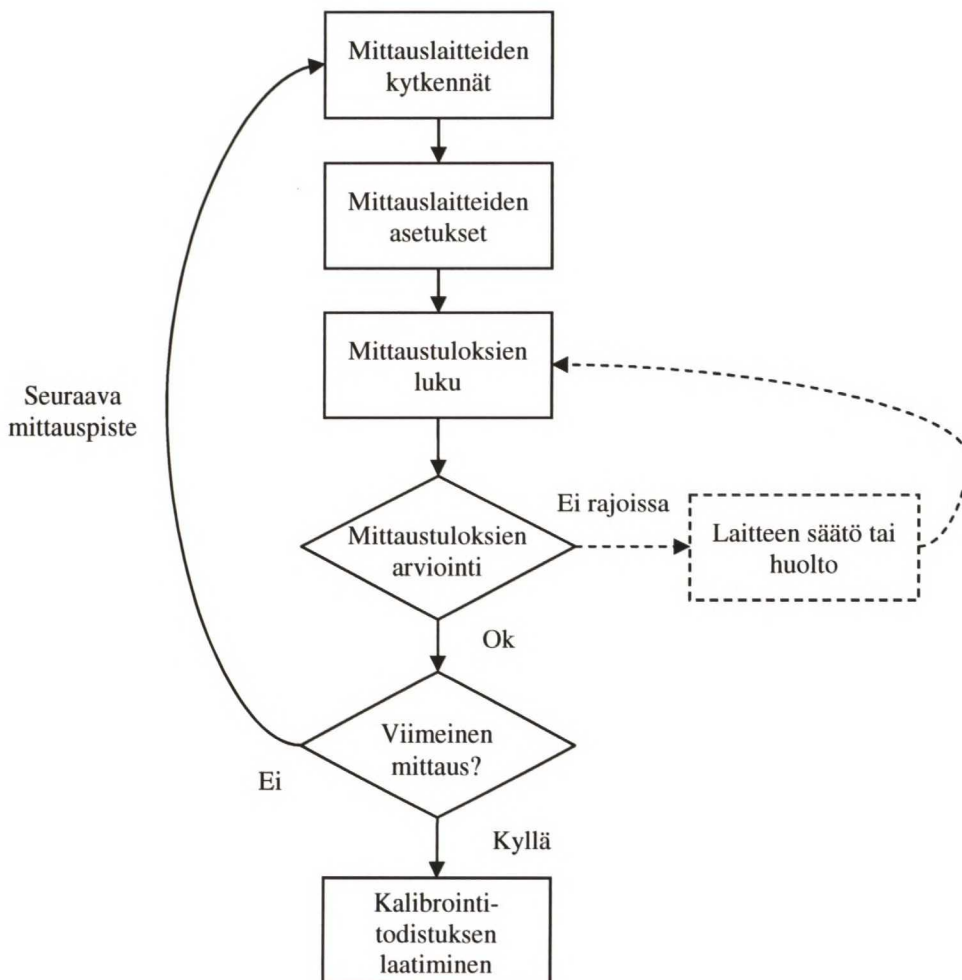
Jotta kalibrointien suoritus olisi yleensä mahdollista, laboratoriolle tulee olla riittävän tarkat mittauslaitteet sekä mittanormaalit. Mittanormaalien toimintaa kannattaa seurata tekemällä vertailumittauksia kalibrointilaboratorion sisällä, jolloin saadaan tietoa laitteiden stabiilisuudesta ja kalibrointiepävarmuuden suuruutta voidaan arvioida tämän perusteella.

Useimpien kalibrointilaboratorioiden toiminta on täysin kaupallista, joten toiminnan kannattavuus on yleensä ensimmäinen edellytys liiketoiminnalle. Edellä mainittujen järjestelyiden toteutus saattaa tulla melko kalliiksi, joten aivan täydellisestä kalibrointiympäristöstä on tingittävä siten, että mittauksista saadaan tarpeeksi luotettavia tuloksia kohtuullisilla kustannuksilla. Mittausten automatisointi kannattaa, jos saman tyyppisiä mittauslaitteita käy usein kalibroinnissa tai mittaukset ovat muuten työläitä tai rutiininomaisia. Automatisointi pienentää kalibrointiin kuluvaa henkilötyöaikaa ja nopeuttaa mittauksia, jolloin useampia mittauslaitteita voidaan ottaa kalibrointiin samanaikaisesti.

### 2.3. Kalibrointitapahtuma

Ennen varsinaista kalibrointia mittauslaitteen ulkoinen kunto tulee tarkistaa. Varsinkin liittimien puhdistukseen kannattaa kiinnittää huomiota, sillä likaisten liittimien aiheuttama mittausvirhe näkyy selvästi optisissa sekä suurtaajuisissa mittauslaitteissa. Lisäksi mittauslaitteen pitää antaa lämmetä vähintään valmistajan spesifikaatiossa määritellyn ajan verran. Laitteiden toimintatarkkuus on usein määritelty vasta tietyn lämpenemisajan jälkeen, joka on yleensä kymmenen minuutin ja 12 tunnin välillä.

Kalibrointiin liittyvät toimenpiteet on esitelty kuvassa 2.4. Kytkennässä saattaa olla monta mittauslaitetta, jolloin näiden kaikkien kytkennöistä ja asetuksista tulee huolehtia. Mittaustulosten lukemisen jälkeen saatuja tuloksia verrataan usein valmistajan asettamiin spesifikaatioihin, eli tarkistetaan onko laitetta syytä säätää tai korjata. Nämä toimenpiteet eivät kuulu varsinaisesti kalibrointiin, mutta käytännössä niitä suoritetaan asiakkaan pyynnöstä. Manuaalisessa mittauksessa tulokset kirjataan yleensä paperille, josta vasta viimeisenä toimenpiteenä tehdään kalibrointitodistus.



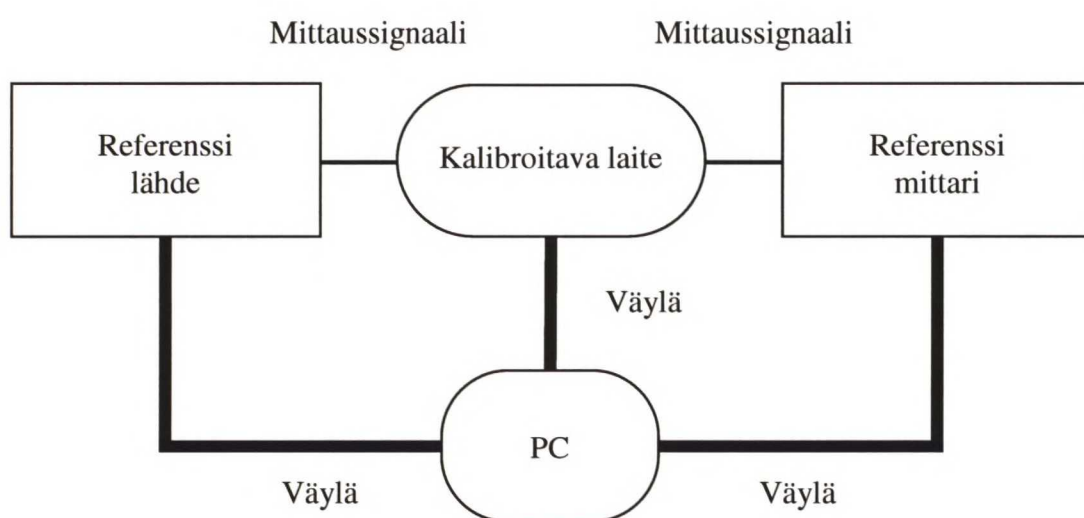
**Kuva 2.4** Kalibrointitapahtuma



## 2.4. Kalibroinnin automatisointi

Kalibroinnissa suoritettavien mittausten automatisointi voidaan toteuttaa kuvan 2.5 osoittamalla tavalla. Mittauslaitteiden ohjauksesta ja mittaustulosten keruusta vastaa yleensä ohjausväylään kytketty PC. Kaikissa mittauslaitteissa ei ole erillistä ohjausväylää, mutta automatisointi voidaan kuitenkin toteuttaa esimerkiksi konenäkösovellutuksella ja hahmontunnistuksella. Toinen vaihtoehto on tehdä ohjelma sellaiseksi, että se antaa käyttäjälle ohjeet asetusten asettamiseksi laitteisiin.

Kalibroinnin aikana kytkentöjä joudutaan usein muuttamaan, joten kytkentään voitaisiin lisätä sopiva PC:llä ohjattava mittausliitäntäyksikkö, johon kaikki tarvittavat kytkennät tehdään kerralla. Liitäntäyksikön käyttö tuo kuitenkin yhden uuden epävarmuustekijän, joita kalibroititoiminnassa pyritään välttämään.



**Kuva 2.5** Automatisoitu kalibroitijärjestelmä

Kalibroinnin automatisoinnilla saavutetaan useita etuja, joista kalibroinnin ajallinen nopeutuminen on vain yksi. Useita mittauspisteitä sisältävä mittaustulos, jossa kytkentä ei muutu, saadaan suoritettua automatoituna varsin nopeasti. Esimerkiksi suurtaajuisia laitteita kalibroitaessa samat mittaukset suoritetaan usealla taajuudella. Jos taajuusasetus joudutaan asettamaan referenssilähteeseen, kalibroitavaan laitteeseen ja referenssimittariin, on automatisoinnin tuottama hyöty varsin suuri. Samalla toistuvien, rutiininomaisten työvaiheiden suorittaminen vähentyy käyttäjältä ja inhimillisten virheiden mahdollisuus pienenee. Saadut mittaustulokset ovat tällöin luotettavampia kuin täysin manuaalisesti tehtyjen mittausten tulokset.

Mittaustulosten tietokoneen avulla voidaan käsitellä tuloksia kalibroijan haluamalla tavalla. Mittaustuloksille voidaan suorittaa matemaattisia operaatioita, niitä voidaan vertailla valmistajan asettamiin suoritustarvoihin tai niistä voidaan piirtää kuvaajia. Laitteiden asetusten ja mittaustulosten perusteella voidaan myös arvioida kalibroinnin mittaustulosten luotettavuus. Kun mittaustulokset saadaan tietokoneelle heti mittaustilanteesta, on kalibroititodistusten laatiminen paljon nopeampaa ja helpompaa verrattuna tilanteeseen, jossa todistus jouduttaisiin laatimaan täysin käsin.



Taulukossa 2.1 on vertailtu manuaalisen ja automaattisen kalibroinnin eroja.

	Manuaalinen kalibrointi	Automaattinen kalibrointi
Kytkenät Lähde / DUT / mittari	Kytkenät tarkistettava kalibrointiohjeista, tehtävä käsin	Ohjelmisto antaa ohjeet kytkennöille, tehtävä silti käsin
Asetukset Lähde / DUT / mittari	Asetukset tarkistettava kalibrointiohjeista, asetettava käsin kaikkiin mittausrakenteisiin	Ohjelmisto asettaa tarvittavat asetukset ohjausväylällä varustettuihin rakenteisiin
Tulosten luku DUT / mittari	Luettava käsin, kirjattava käsin	Ohjelmisto lukee ja tallentaa tulokset
Tulosten arviointi DUT / mittari	Kalibroijan arvioitava itse, mahdolliset matemaattiset tulosten käsittelyt suoritettava käsin	Ohjelmisto ilmoittaa spesifikaatioista poikkeavista mittaus-tuloksista ja voi suorittaa tuloksille laskutoimituksia
Kalibrointitodistuksen tekeminen	Tehtävä käsin mittauspöytäkirjan perusteella	Ohjelmisto voi tehdä suurimman osan todistuksesta

**Taulukko 2.1** Manuaalisen ja automaattisen kalibroinnin vertailu

Automaattisen kalibrointiohjelman tuomaa konkreettista ajan säästöä voidaan tarkastella esimerkiksi yksinkertaisen yleismittarin kalibroinnin avulla. Taulukossa 2.2 on esitetty normaalin yleismittarin kalibrointiin kuluva aika manuaalisena sekä automaattisena mittauksena. Esimerkissä lähteenä toimii yleismittarikalibraattori ja erillisiä mittauksia oli yhteensä viisi kappaletta. Tuloksissa ei ole huomioitu mahdollisten kalibrointiohjeiden hankkimiseen ja tutustumiseen kuluva aika.

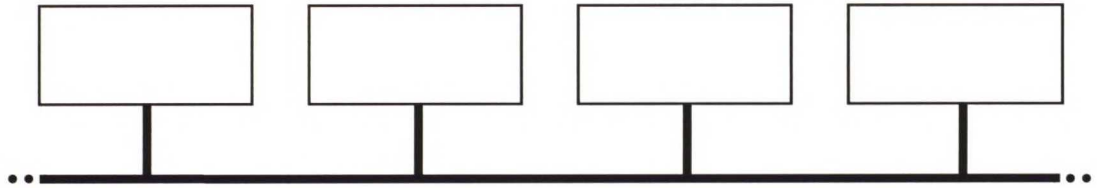
	Manuaalinen kalibrointi	Automaattinen kalibrointi
Kytkenät Lähde / DUT	2 kpl x 10 s = 20 s	2 kpl x 10 s = 20 s
Asetukset Lähde / DUT	5 mittaus x 10 mittauspistettä x 10 s = 500 s	5 mittaus x 10 mittauspistettä x 1 s = 50 s
Tulosten luku DUT	5 mittaus x 10 mittauspistettä x 5 s = 250 s	5 mittaus x 10 mittauspistettä x 0,5 s = 25 s
Tulosten arviointi DUT	5 mittaus x 10 mittauspistettä x 5 s = 250 s	5 mittaus x 10 mittauspistettä x 0,1 s = 5 s
Kalibrointitodistuksen tekeminen	noin 15 minuuttia	noin 5 minuuttia (ainakin tulokset valmiina)
Yhteensä	32 minuuttia	7 minuuttia

**Taulukko 2.2** Yleismittarin kalibroinnin vertailu manuaalisena ja automaattisena mittauksena

## 2.5. Väyläratkaisut

### 2.5.1. Fyysiset mallit

Ohjausväylien fyysinen kaapelointi voidaan toteuttaa monella eri tavalla, joita ovat mm. yhteinen väylä, ketjutus, tähtikytcentä ja rengaskytcentä.



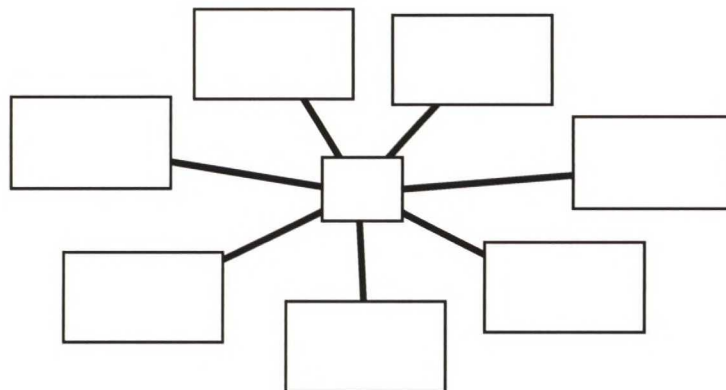
**Kuva 2.6** Yhteinen väylä

Yhteinen väylä (kuva 2.6) mahdollistaa helpon tavan lisätä laitteita tiedonsiirto-verkkoon ja verkon muuttaminen erilaiseksi on myös vaivatonta. Laitteet ovat tällöin myös yhteydessä kaikkiin muihin laitteisiin, jolloin tiedonsiirto niiden välillä on varmistettu. Jokainen lähetys leviää koko väylään, ja mikä tahansa laite voi vastaanottaa sen [13].



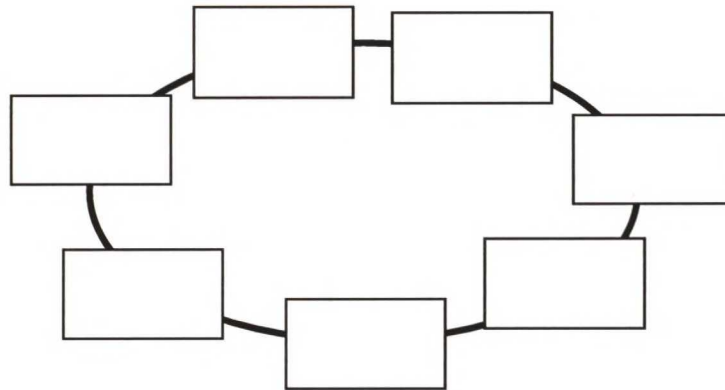
**Kuva 2.7** Laitteiden ketjutus

Laitteita ketjuttaessa (kuva 2.7), vain vierekkäiset laitteet voivat kommunikoida keskenään, jolloin kukin laite voi päättää sen kauttakulkevien komentojen välittämisestä. Yhden laitteen rikkoutuminen tai väylän katkeaminen johtaa koko verkon lamaan.



**Kuva 2.8** Tähtikytcentä

Tähtikytcentässä (kuva 2.8) kaikki laitteet on yhdistetty yhteiseen kontrolleriin, joka päättää kommunikointivuoroista ja käskyjen perillemenosta. Kontrolleri voi myös olla passiivinen ja sen rikkoutuessa verkko toimintakyvytön.



**Kuva 2.9** Rengaskytkentä

Rengaskytkennässä (kuva 2.9) kiertävällä väylällä ei ole avoimia päitä, vaan se muodostaa fyysisesti renkaan. Rengasväylän liikenne on usein vain yksisuuntaista, jolloin yhden laitteen tai linkin rikkoutuminen saattaa johtaa koko verkon halvaantumiseen. Joskus rengasväylässä on kaksi rengasta, toinen tulevalle ja toinen lähtevälle liikenteelle. Tällöin yhden laitteen rikkoutumisesta johtuva katkos voidaan välttää yhdistämällä nämä kaksi rengasta yhdeksi renkaaksi katkoskohdista. Laitteiden lisääminen rengaskytkentään on yleensä melko hankalaa.

Edellä tarkasteltuja väylämalleja voidaan yhdistellä, jolloin saadaan ns. hybridiverkkoja. Puumainen verkko on topologia, jossa on tähtikytkennän piirteitä, mutta se on samalla rakenteeltaan hierarkkinen. Yhteys (point-to-point link) on yksinkertainen verkkorakenne, se tarjoaa yhteyden vain kahden laitteen välille [14]. Muunlaiset verkkorakenteet ovat harvinaisempia mittauslaitteiden ohjausväylinä.

Väylärakenteen valinta riippuu täysin tilanteesta ja valitun väylästandardin rajoituksista. Esimerkiksi normaalilla sarjaliitännällä ei voida muodostaa kuin yksinkertainen yhteys vain kahden laitteen välille. Väylästandardi sanelee myös liittimien ja johdotuksen tyyppin. Jos liitäntä on rinnakkaistyyppinen, johdotus on paksua ja kalliimpaa sarjaliitäntään verrattuna. Toisaalta rinnakkaistyyppinen tiedonsiirto on teoriassa nopeampaa, sillä sen avulla tavut lähetetään yhdellä kertaa, kun sarjamuotoisessa liikenteessä ne joudutaan lähettämään bitti kerrallaan. Kuitenkin hyvin nopeita (yli 100 Mbit/s) sarjamuotoisia siirtotapoja on kehitetty ja otettu käyttöön mittauslaitteiden ohjaamiseksi.

Yhteinen väylä on joustavin verkkorakenne mittauslaitteiden ohjaamiseksi. Sen avulla liitäntäkaapeleiden määrä saadaan pieneksi ja systeemin muuttaminen on helppoa [15].

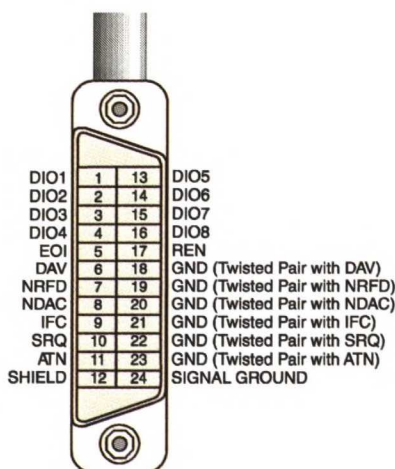


## 2.5.2. IEEE 488

IEEE 488 väylän ensimmäinen versio oli Hewlett-Packardin kehittämä HP-IB-väylä (Hewlett Packard Interface Bus), joka suunniteltiin vuonna 1965 mittauslaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen. Hewlett-Packardin tarkoitus oli rakentaa yhtenäinen väyläliityntä omiin mittauslaitteisiinsa, joita tulevaisuudessa kehitettäisiin. Vuonna 1975 HP-IB-väylä sai virallisen aseman standardin IEEE 488 myötä. Myös IEC ja ANSI julkaisivat luonnoksensa standardista. Lopulta kehitys johti ANSI/IEEE:n määrittelemään ja julkaisemaan standardiin 488.1 vuonna 1987 ja myöhemmin samana vuonna laajennettuun standardiin IEEE 488.2. [16]

Väylä saavutti heti suuren suosion ja eri standardijärjestöt julkaisivatkin väylästä omat standardinsa, jonka johdosta se on saanut useita kaupallisia nimityksiä. Standardit IEEE 488.1, ANSI MC1.1, IEC 60625.1, B.S 6146 ja NFC 42-910 vastaavat toisiansa lähes identtisesti [16,17]. IEEE 488.1 standardia vastaavia kaupallisia nimiä ovat HP-IB, GPIB (General Purpose Interface Bus), IEEE BUS, ASCII BUS ja PLUS BUS [16]. Tässä dokumentissa käytetään väylästä nimitystä GPIB.

GPIB-väylä on ehdottomasti suosituin ohjausväylä tämän hetken mittauslaitteissa. Lähes jokaisessa mittauslaitteessa se on vakiona tai ainakin saatavana optiona. Väylän suosiota tukee myös sen melko suuri tiedonsiirtonopeus, 1 Mt/s ja sen fyysinen väylämuoto, joka on hyvin joustava (yhteinen väylä, tähtikytKentä tai niiden yhdistelmä). Mittauslaitteita on helppo lisätä mihin tahansa kohtaa väylää, sillä liittimet ovat kaksipuolisia, eli päällimmäisen päälle voi lisätä aina yhden liittimen. Yhteen väylään voidaan kytkeä korkeintaan 15 laitetta ja väyläkaapelin pituus voi olla kaksi metriä kertaa laitteiden lukumäärä, kokonaispituus kuitenkin maksimissaan 20 metriä.



**Kuva 2.10** GPIB-liitin [18]

GPIB-väylän liittimessä (kuva 2.10) on 16 signaalilinjaa, jotka on jaettu tiedonsiirtolinjoihin, kättelylinjoihin ja hallintalinjoihin. Tiedonsiirtolinjat (DIO1-DIO8) kuljettavat käskyt laitteille ja niiltä tulevan informaation. Tiedonsiirto tapahtuu yleensä 7-bittisesti rinnakkaismuotoisesti, jolloin kahdeksatta bittiä (DIO8) ei käytetä tai sitä käytetään pariteettitiedon siirtoon. [18]



Kättelylinjat kontrolloivat tiedonsiirtolinjojen toimintaa siten ettei virheitä synny. Signaalilinja NRFD (not ready for data) ilmoittaa, kun laite on valmis vastaanottamaan viestitavun. Signaalilinja NDAC (not data accepted) ilmoittaa, kun laite on vastaanottanut viestitavun. Signaalilinja DAV (data valid) kertoo, koska signaalit linjoilla ovat oikeanlaisia ja laitteet voivat vastaanottaa niitä. [18]

Hallintalinjat ohjaavat informaation kulkua liitäntöjen välillä. Linja ATN (attention) ilmoittaa onko lähetetty viesti tyypiltään käsky vai informaatio. Väylän kontrolleri käyttää signaalilinjaa IFC (interface clear) alustaakseen väylän ja linjaa REN (remote enable) asettaakseen väylän laitteet kauko-ohjaustilaan. Signaalilinjaa SRQ (service request) voi mikä tahansa väylän laite käyttää pyytääkseen huomiota kontrollerilta. Linjaa EOI (end or identify) käytetään merkitsemään viestin päättyminen ja toisaalta sitä käytetään myös rinnakkaiskyselyn ohjaamiseen. [18]

GPB-väylään liitetyt laitteet voivat olla puhujia, kuuntelijoita tai kontrollereita. Puhuja lähettää tietoa yhdelle tai useammalle kuuntelijalle, jotka vastaanottavat tiedon. Puhujia voi olla väylässä yhtäaikaaisesti vain yksi, mutta kuuntelijoita 14 kappaletta. Puhuja voi olla esimerkiksi mittaustuloksia lähettävä mittauslaite ja kuuntelija käskyjä vastaanottava mittauslaite. Kontrolleri hallinnoi informaation kulkua väylässä lähettämällä komentoja laitteille ja määräämällä puhujat ja kuuntelijat. Väylän kontrollerina toimii usein GPB-väyläkortilla varustettu tietokone.

## IEEE 488.2

Vuonna 1987 hyväksyttiin myös standardi IEEE 488.2, joka on standardin IEEE 488.1 laajennus. Standardi parantaa mahdollisuuksia hallita suurempia mittauslaitesysteemejä ja siinä on parannettu statuskäsittelyä, erilaisia kontrolleritoimintoja ja laajennettu yleisiä komentoja [16].

IEEE 488.2 määrittelee väylän kontrollerille vaatimukset komentojen lähettämisestä ja signaalilinjojen tarkan käytön. Standardi esittelee myös suosituksia kontrollerille, kuten signaalilinjojen kuuntelemisen diagnostisiin tarkoituksiin. Väylän käyttämät kontrollisekvenssit on määritelty tarkoin ja niitä noudattamalla saavutetaan hyvin yhteensopiva järjestelmä. Standardi sisältää kaksi pakollista protokollaa kontrollerille, jotka ovat RESET (väylän alustus) ja ALLSPOLL (sarjamuotoinen kysely). Valinnaisia protokollia ovat mm. FINDLSTN (kuuntelijoiden etsiminen), SETADD (osoitteiden dynaaminen muuttaminen) ja FINDRQS (palvelupyyntöjen etsiminen väylältä). Standardi määrittelee tiedonsiirron lopettamismerkiksi rivinvaihdon yhdistettynä ASCII-tavuun 0A, jota kaikkien väylän laitteiden on käytettävä. Ennen standardia mittauslaitteiden valmistajat päättivät itse lopettamismerkkin, joten käytäntö oli kirjavaa ja ohjelmoijalle hankalaa. [19]

Standardi määrittelee myös väylässä olevien instrumenttien toiminnalliset vaatimukset. IEEE 488.2 -pohjaiset mittauslaitteet käyttävät standardinmukaisia viestinvälitysprotokollia ja viestimutoja, joten niiden vastaukset kyselyihin ovat hyvin määriteltyjä. Viestinvälitysprotokolla määrittelee termit *anteeksiantava kuuntelu* (*forgiving listening*) ja *täsmällinen puhuminen* (*precise talking*). Anteeksiantava kuuntelu sallii erilaisia käskyjen lukuarvoja, kuten esimerkiksi 50, +50.512 tai 5.0E+1. Jos lukuarvo on liian tarkka tai mittauslaitteen suorituskyvyn

ulkopuolella, pyöristetään luku lähimpänä olevaan sallittuun arvoon. Täsmällinen puhuminen pakottaa standardin mukaisen mittauslaitteen antamaan kuitenkin täsmällisen vastauksen kyselyyn, eli esimerkiksi mittautuloksia ei saa pyöristää. Tiedonesitystapoina toimivat esimerkiksi seitsemänbittinen ASCII-koodaus aakkosnumeerisille merkeille, kahdeksanbittinen binäärikoodaus kokonaisluvuille ja standardin IEEE 754 mukainen koodaus liukuluvuille. Kysymysmuotoiset käskyt, joihin odotetaan vastausta, ovat samankaltaisia kuin normaalit käskyt mutta niitä seuraa kysymysmerkki. Ohjelmoijan työtä helpottaa myös standardin määrittelemät pakolliset käskyt (taulukko 2.3) sekä valinnaiset käskyt, joita voidaan siis käyttää kaikille standardin mukaisille mittauslaitteille riippumatta valmistajasta ja tyypestä. [18,19]

Käsky	Selitys
*IDN?	Laitteen tunnistuskysely (palauttaa mm. valmistajan ja laitetyypin)
*RST	Laitteen alustus
*TST?	Itsetestauksen käynnistys ja sen tulosten kysely
*OPC	Toimenpiteen valmistuminen
*OPC?	Toimenpiteen valmistumisen kysely
*WAI	Valmistumisen odottaminen
*CLS	Statuksen tyhjennys
*ESE	Tapahtumarekisterin aktivointi
*ESE?	Tapahtumarekisterin tilan kysely
*ESR?	Tapahtumarekisterikysely
*SRE	Huoltopyyntöjen aktivointi
*SRE?	Huoltopyyntöjen tilan kysely
*STB?	Tilatiedon kysely

**Taulukko 2.3** Standardin IEEE 488.2 pakolliset käskyt [18,19]

### HS488

National Instruments on kehittänyt standardin IEEE 488.1 pohjalta nopeampaa tiedonsiirtoa tarjoavan protokollan HS488 (High Speed 488). Tiedonsiirron nopeus saavutetaan nopeammalla kättelymekanismilla, josta on viiveitä pienennetty. Protokollan avulla voidaan saavuttaa jopa 8 Mt/s tiedonsiirtonopeus. Jotta protokollaa voisi käyttää, on kaikkien väylän laitteiden tuettava sitä, muuten HS488-yhteensopivien laitteiden on käytettävä hitaampaa kättelyä. [18]

HS488-yhteensopivia mittauslaitteita on vain vähän markkinoilla ja ne soveltuvatkin paremmin esimerkiksi nopeiden tuotantolinjojen mittauksiin. Kalibrointitoiminnassa mittaukset ovat luonteeltaan melko hitaita, joten ei ole erityistä syytä hankkia HS488-yhteensopivia kalibrointijärjestelmiä. Kalibroitavissa mittauslaitteissa saattaa olla HS488 käytössä, mutta se on täysin yhteensopiva alkuperäisen IEEE 488.1-väylän kanssa, kunhan käytetään hitaampaa nopeutta.



### 2.5.3. Sarjaliitântä

Sarjaliitântä on yksinkertainen tapa tiedonsiirtoon mittauslaitteen ja tietokoneen välillä. Lähes kaikissa tietokoneissa on standardin RS-232C mukainen sarjaliitântä, joten se on samalla myös yksinkertaisin tapa liittää mittauslaite tietokoneeseen. GPIB-väylä vaatii tietokoneeseen erillisen, melko kalliin lisäkortin, jotta väylän laitteita voitaisiin ohjata. Myös mittauslaitteessa täytyy olla sarjaliitântä, joka kuitenkin ei ole yhtä yleinen kuin GPIB-liitântä. Normaali sarjaliitântä on tyypiltään yksinkertainen yhteys, eli se mahdollistaa tiedonsiirron vain kahden laitteen välillä. Kuitenkin PC-tietokoneissa on yleensä kaksi sarjaliitântää, joten kahden laitteen ohjaaminen on mahdollista ilman lisälaitteita. Tiedonsiirron nopeus laitteiden välillä riippuu yleensä mittauslaitteesta, sillä nykyiset PC:t kykenevät jopa tiedonsiirtonopeuteen 16 kt/s. Mittauslaitteet kykenevät yleensä vain murto-osaan tästä. Muutaman kilotavun sekuntinopeus voi hidastaa monimutkaisia mittauksia huomattavasti.

Tietokoneen sarjaliitännän toiminta on määritelty EIA:n standardissa RS-232C. Sitä vastaavat myös CCITT:n standardit V.24 ja V.28. Alkuperäisen 25-napaisen liittimen mekaaniset ominaisuudet on määritelty standardissa ISO 2110. Sarjaliitännän tärkeimmät piirit voidaan kuitenkin sisällyttää pienempään, 9-napaiseen liittimeen, jonka ominaisuudet on kuvattu standardissa ISO 4902. Nykyisissä tietokoneissa on tilansäästön vuoksi käytössä 9-napainen sarjaliitântä. Sarjaliitännän eräs hyvä ominaisuus on kaapelin maksimipituus, joka on standardissa RS-232C määritelty 50 jalaksi (noin 15 metriä). Käytännössä johtimen maksimipituuden määrää signaalijohtimen kapasitanssi, joka aiheuttaa signaalin nousu- ja laskuaikojen pidentymistä. Sarjaliitännän voi saada toimimaan kaapelityypistä riippuen jopa 200 metrin pituisilla yhteyksillä. Suurissa mittauslaitesysteemeissä näin suurista pituuksista voi olla hyötyä, mutta käytännön kalibrointilanteissa ei tarvita muutamia metrejä pidempiä yhteyksiä. [20]

Teollisuusympäristössä saattavat nousta esille häiriöongelmat varsinkin pitkillä etäisyyksillä. Standardin RS-422 mukaisessa sarjaliitännässä käytetään differentiaalista siirtoa RS-232C:n balansoimattoman siirron sijaan. Differentiaalinen siirto, joka käyttää kahta johdinta jokaiselle lähetys- ja vastaanottosignaalille, parantaa häiriönsietoa ja pidentää kaapelin maksimipituutta. Samalla lähetysnopeutta voidaan kasvattaa kaapelin pituudesta riippuen jopa 10 Mbit/s saakka. RS-422 on käytössä yleisesti Applen tietokoneissa ja teollisuuden automaatiojärjestelmissä. Se mahdollistaa yhden lähettäjän lisäksi kymmenen vastaanottajaa. [21]

RS-485 on vielä paranneltu versio RS-422:sta. Sen avulla voidaan sarjaväylässä käyttää yhtäaikaaisesti 32:tä lähetintä ja vastaanottajaa. Standardi määrittelee lisäksi liitännän sähköiset ominaisuudet siten, että riittävä signaalijännite voidaan taata maksimikuormalla. Väylässä saa olla yksin lähetin aktiivinen kerrallaan, jolloin muut ovat suuri-impedanssisessa tilassa ja kuuntelevat väylää. RS-485:n avulla päästään samoihin tiedonsiirtonopeuksiin kuin RS-422:n avulla. Standardin häiriönsieto ja monipisteliityntä tekevät siitä kiinnostavan väylän teollisuuden käyttöön. Väylä on lisäksi edullinen toteuttaa ja kohtuullisen yksinkertainen esimerkiksi tiedonkeruuseen. [21]



### 2.5.4. VXI

VXI-väylästandardi on kehitetty vanhemman, VME-standardin (Versa-Module Europa, IEEE 1014) pohjalta, josta nimi VXIbus (VMEbus Extensions for Instrumentation). Standardin takana oli VXI-yhteenliittymä, jossa olivat mukana Colorado Data Systems, Hewlett-Packard, Tektronix, Wavetek ja Racal-Dana [16]. Virallisen hyväksynnän VXI-standardi sai vuonna 1992 IEEE:n standardilla 1155, jonka jälkeen muodostettiin VXIplug&play Systems Alliance, jonka tehtävänä on huolehtia ohjelmiston standardisoinnista.

VXI-väylästandardi tuli tarpeeseen, sillä teollisuus ja varsinkin armeija tarvitsi pienempiä ja tehokkaampia mittauslaitejärjestelmiä. Standardi tarjosi modulaarisen järjestelmän, jolle oli määritelty tarkat ajastukset sekä synkronisointi laitteiden välillä. Samalla tiedonsiirtonopeus saatiin GPIB-väylää nopeammaksi. VME-väylä oli osoittautunut kaupalliseksi menestykseksi, mutta se tarvitsi muutoksia, jotta VME ja suosittu GPIB voitiin yhdistää. Suurimmat muutokset koskivat tehonkulutuksen, jäähdytyksen ja sähkömagneettisen yhteensopivuuden määrittelyjä. VXI-väylän tarkka määrittely mahdollistaa eri valmistajien mittauslaitteiden käytön samassa kehikossa.

IEEE 1155 sisältää mm. seuraavat väylän määrittelyt:

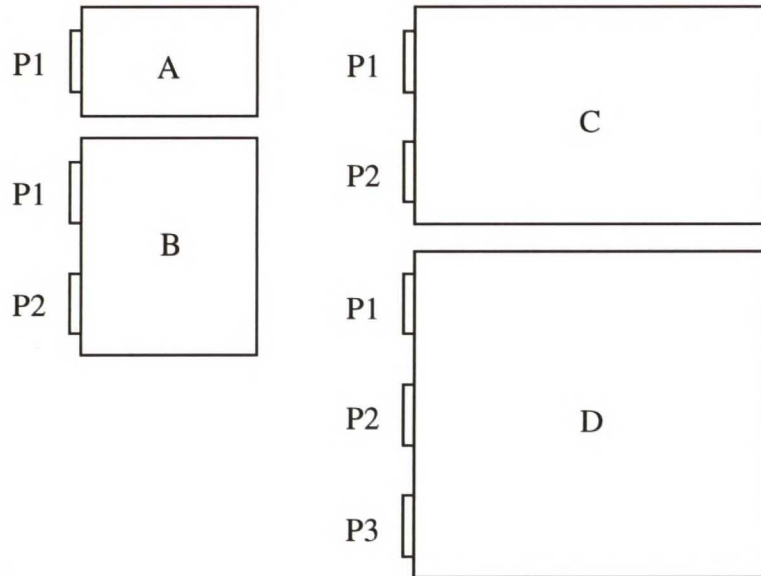
- VME-väylän implementointi
- mekaaninen määrittely
- sähköinen määrittely
- sähkömagneettinen yhteensopivuus
- VXI-väylän laitetypit
- järjestelmän tehonsyöttö ja jäähdytys
- VXI-väylän laitteiden ohjaus
- VXI-väylän tiedonsiirtoprotokollat

Lisäksi standardi sisältää määrittelyt resurssienhallinnalle ja rekisteripohjaisille laitteille. [16]

VXI-väylän edut teollisuuskäytössä ovat huomattavat GPIB-väylään verrattuna. Mittauslaitteet mahtuvat huomattavasti pienempään tilaan ja jopa ohjain (tietokone) voidaan sulauttaa VXI-kehikkoon. Näin saadaan itsenäisesti toimiva kompakti järjestelmä, joka korvaa erillismittauslaitteet ja tietokoneen. VXI-järjestelmä on käyttökelpoinen nopeissa tuotantolinjan mittauksissa, sillä sen avulla saavutettava tiedonsiirtonopeus on jopa kymmeniä kertoja GPIB-väylää nopeampaa. Lisäksi VXI-mittauslaitteet ovat usein erillismittauslaitteita edullisempia ja VXI-järjestelmiin voidaan liittää erillislaitteita GPIB-väylän avulla.

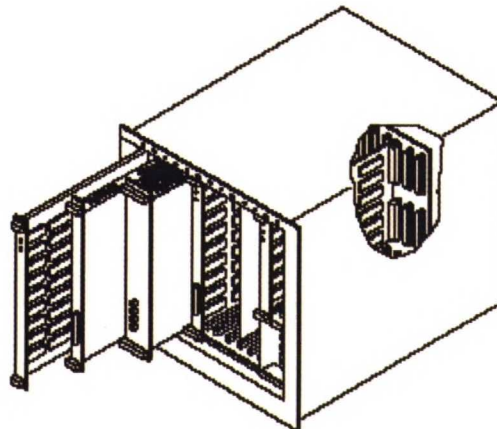
Pienestä koosta johtuen markkinoilla ei ole ollut juurikaan VXI-tuotteita, jotka pystyisivät käsittelemään suurtaajuisia signaaleita. Vasta viime aikoina on pystytty kehittämään tällaisia VXI-kehikkoihin sopivia mittauslaitteita. Esimerkiksi Gigatronics valmistaa 20 GHz:n generaattoria 50220B ja Morrow Technologies 8,5 GHz:n spektrianalysaattoria V9085. Näissä molemmissa laitteissa taajuutta on pystytty nostamaan laitteiden fyysisen koon kustannuksella, sillä molemmat laitteet vievät kolme VXI-paikkaa.

Fyysisesti VXI-järjestelmä koostuu laitekehikosta ja siihen liitettävistä korteista. Kehikko sisältää paikat mekaanisesti 1,2 tuuman leveille korteille, joiden sähköinen liitäntä perustuu 32-bittiseen VME-arkkitehtuuriin. Kuva 2.11 esittelee VXI-järjestelmän korttikoot, joista C ja D ovat uusia VME-järjestelmään verrattuna. Liittimet P1 ja P2 ovat samoja kuin VME-järjestelmässä. Suurimmassa korttikoossa, D-koossa, on lisäksi uusi P3-liitin, joka on fyysisesti samanlainen kuin P1- ja P2-liittimet. [22]



**Kuva 2.11** VXI-väylän korttikoot

Korttien koot ovat toistensa monikertoja: B-kortti on kaksi kertaa A-kortin korkuinen, C-kortin syvyys on kaksi kertaa B-korttia suurempi ja D-kortti on C-korttia 1/3 korkeampi, johtuen uudesta liittimestä. VXI-järjestelmän kehikoita valmistetaan kaikille korttityypeille, mutta C-koko on suosituin koko tällä hetkellä teollisuudessa. Pienempiä kortteja voidaan käyttää suuremmissa kehikoissa sovittimien avulla. Normaaliin 19 tuuman laiteräkkiin sopivaan VXI-laitekehikkoon mahtuu 13 korttia. Laitekehikkoja valmistetaan myös pieninä, kannettavina järjestelminä ja usean kymmenen kortin ketjutettuina järjestelminä. Kuvassa 2.12 esitellään VXI-kehikon perusrakenne.



**Kuva 2.12** VXI-järjestelmän kehikko [22]



VXI-väylän sähköiset liitännät muodostuvat P1-, P2- ja P3-liittimistä. Näistä P1 on pakollinen, se esiintyy kaiken kokoisissa korteissa. Liitin P3 on ainoastaan D-koon korteissa, jotka ovat tarkoitettu kaikkein vaativimpiin sovellutuksiin. Liittimet ovat samanlaisia, standardoituja 96-pinnisiä DIN-liittimiä. Yhteenvedo liittimien väylistä on esitelty taulukossa 2.4.

Liitin P1	Liitin P2	Liitin P3
Tiedonsiirtoväylä	VME-väylän 32-bittinen tiedonsiirtoväylä	
Osoiteväylä	Osoiteväylän laajennus	
Tehonsyöttö	Tehonsyöttö	Lisätty tehonsyöttö
Hallintaväylä	10 MHz:n kellosignaali	100 MHz:n kellosignaali
Keskeytysväylät	Liipaisuväylät	Liipaisuväylän laajennukset
	Paikallisväylä	Paikallisväylän laajennus
	Moduulien tunnistusväylä	
	Summausväylä	

**Taulukko 2.4** VXI-korttien liittimet [16, 22]

Yksi tärkeimmistä väylistä VXI-järjestelmässä on VME-väylä. Se tarjoaa tiedonsiirron ja keskeytykset korttien välillä. VME:n tiedonsiirto suoritetaan asynkronisesti 8-, 16-, tai 32-bittisesti. VXI-järjestelmän liipaisuväylät jakautuvat kahdeksaan TTL-tasoiseen ja kuuteen ECL-tasoiseen linjaan, joita voidaan käyttää liittimistä P2 ja P3. Analoginen summausväylä on kaikille kehikon laitteille yhteinen väylä, johon syötettävät signaalit summataan eli sitä voidaan käyttää esimerkiksi mielivaltaisten aaltomuotojen luomiseen. Kello- ja synkronointiväylästä saadaan 10 MHz:n ja 100 MHz:n synkronisoidut kellopulssit. Kellosignaalit tuotetaan VXI-kehikon ensimmäisessä, ns. Slot-0, controllerikortissa. Kellosignaalit voidaan tuoda myös ulkoisesta lähteestä Slot-0 laitteelle tarvittaessa. Liittimeen P3 on määritelty tähtiväylä, jonka avulla voidaan tarjota erittäin nopea kommunikaatioyhteys moduulien välillä. Moduulientunnistusväylä on Slot-0:n hallinnoima väylä, jonka avulla kehikon korttien fyysiset paikat tiedustellaan. VXI-järjestelmän paikallisväylä muodostuu vierekkäisten korttien välille. Tämä tarkoittaa, että jokaisella kortilla on oma väylä vasemmalla ja oikealla puolella sijaitsevalle kortille. Poikkeuksena tietenkin kehikon ensimmäinen ja viimeinen kortti. Paikallisväylän tarkoituksena on vähentää erilaisten jumbpereiden ja ulkopuolisten kytkentöjen tarvetta, jolloin korttien välillä voidaan kommunikoida ilman, että kuormitettaisiin VXI-järjestelmän yhteisiä väyliä. Tämä mahdollistaa sen, että vierekkäiset VXI-kortit voivat kommunikoida keskenään kuormittamatta muuta järjestelmää. Lisäksi VXI-järjestelmä pitää sisällään tehonsyöttöväylän, josta saadaan jännitteet, korttikoosta riippuen, +5V, ± 12V, -2V ja -5,2V. [16]

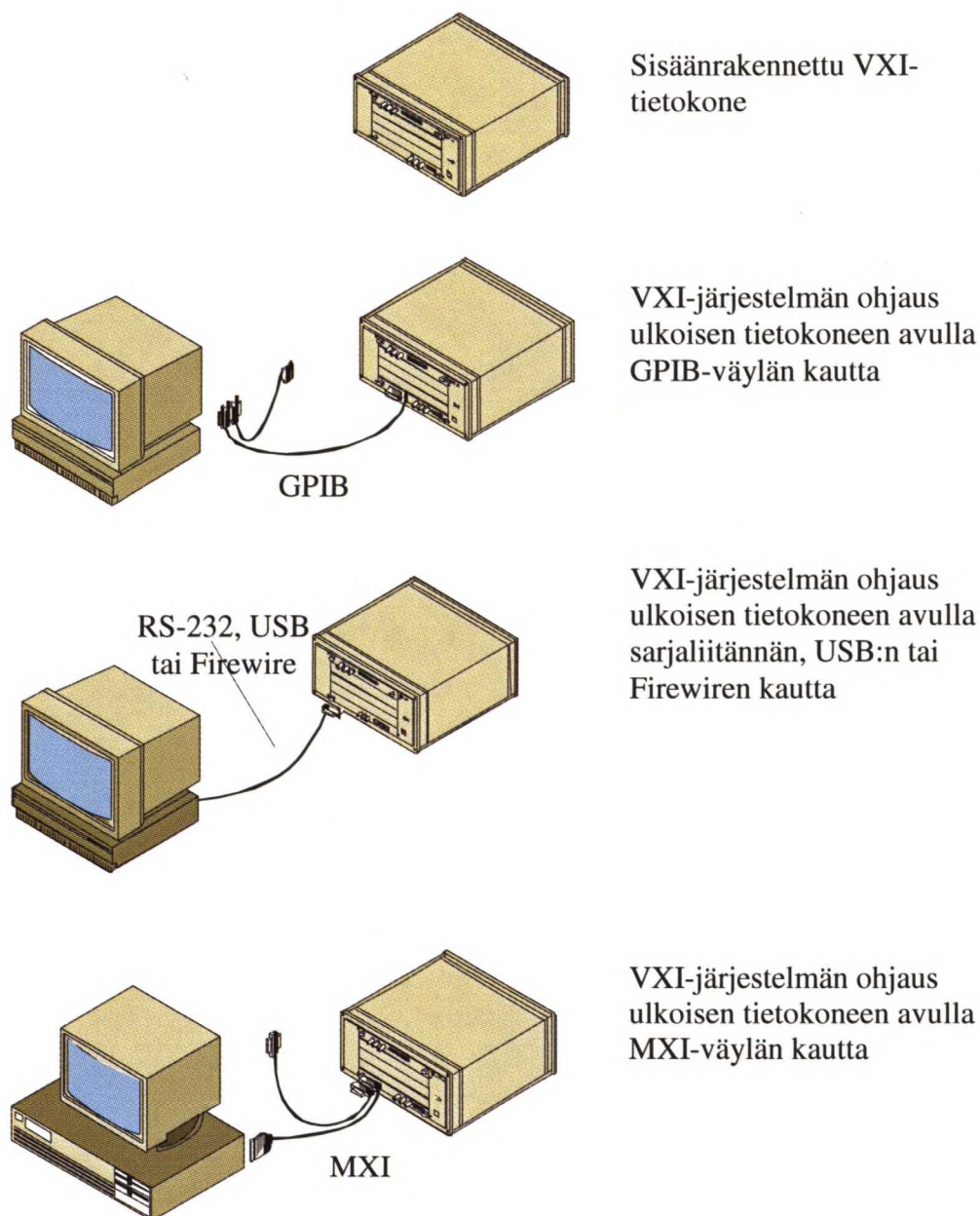


Käytännössä VXI-korttien laitetypit voivat olla rekisteripohjaisia tai sanomapohjaisia. Lisäksi on määritelty laajennetut laitteet ja muistilaitteet [16]. Rekisteripohjaiset laitteet ovat yksinkertaisia laitteita, jotka kykenevät vain minimaalisiin tiedonsiirtotoimintoihin. Näitä laitteita ohjataan niissä olevien asetusrekisterien avulla. Sanomapohjaiset laitteet tukevat sarjamuotoista sanaprotokollaa, jonka avulla voidaan lähettää tavu kerrallaan muille laitteille vastaavasti kuten IEEE 488-protokollan mukaisessa tiedonsiirrossa [22]. Sarjamuotoinen sanaprotokolla perustuu 16-, 32- tai 48-bittiseen tiedonsiirtoon. Sanomapohjaiset laitteet ovat tiedonsiirtoprotokolliltaan rekisteripohjaisia laitteita kehittyneempiä.

VXI-väylän laitteita ohjataan niiden loogisten osoitteiden perusteella. Osoitteet ovat välillä 0-255, joten yhdessä systeemissä voi olla maksimissaan 256 laitetta. Osoitteet asetetaan väylän laitteisiin kytkimillä, mutta ne voidaan asettaa myös ohjelmallisesti. Rekisteripohjaisten laitteiden ohjaus on vaikeampaa kuin sanomapohjaisten laitteiden, sillä niiden ohjaaminen onnistuu vain matalan tason rekisterikirjauksilla. Toisaalta tällainen ohjaus on hyvin nopeaa. Jotta VXI-järjestelmä toimisi, tarvitsee se resurssien hallitsijan, joka sijaitsee yleensä Slot-0-laitteessa. Resurssien hallitsijan tehtävänä on vastata laiteosoitteiden hallinnasta sekä rekisteripohjaisten laitteiden ja muistin automaattisista asetuksista.

VXI-järjestelmä tarvitsee lisäksi kontrollerin, joka varsinaisesti komentaa VXI-väylän laitteita. Kontrolleri siis asettaa tai lukee laitteiden asetukset ja hakee mahdolliset mittaustulokset. Yleensä kontrolleri on ulkoinen tietokone monikäyttöisyytensä ja edullisuutensa vuoksi, mutta markkinoilla on saatavana myös VXI-kehikkoon asennettavia kontrollereita/tietokoneita. Sisäisen tietokoneen etuja ulkoiseen tietokoneeseen verrattuna ovat hyvä integrointiaste, pieni tilantarve, nopea liitäntä suoraan VXI-väylään ja hyvä yhteensopivuus VXI-järjestelmään. Sisäänrakennettu tietokone sisältää yleensä samat liitännät kuin normaali PC, joten siihen voidaan tarvittaessa liittää esimerkiksi näyttö ja näppäimistö. Tilan säästämiseksi nekin voidaan jättää pois, sillä sisäänrakennettua tietokonetta voidaan myös ohjata lähiverkon kautta. VXI-järjestelmiä voidaan liittää toisiinsa siten, että yksi sisäänrakennettu kontrolleri ohjaa omaa sekä muita järjestelmiä.

Ulkoinen tietokone kytketään VXI-kehikon Slot-0 laitteeseen erillisellä väylällä. Tavallisimpia väylävaihtoehtoja ovat GPIB ja sarjaliitäntä, jotka usein sijaitsevat samassa komentomodulissa. GPIB-väylän kautta voidaan ohjata laitetta viestipohjaisesti kuten perinteisiä erillismittauslaitteita. Käytettäessä GPIB-väylää laitteiden ohjaamiseen, VXI-väylän laite erotellaan VXI-kehikon osoitteella sekä toissijaisella osoitteella eli laitteen VXI-väylän osoitteella. Sarjaliitainta voidaan käyttää järjestelmän ohjaukseen samalla tavalla, mutta se tarjoaa usein myös pääteyhteyden VXI-järjestelmän ja tietokoneen välille. Pääteyhteyteen on sisäänrakennettuna valikkopohjainen ohjelmisto, jonka avulla voidaan mm. katsella ja muuttaa järjestelmän asetuksia. Pääteyhteyden avulla voidaan jopa ohjata saman valmistajan mittauslaitteiden asetuksia ja lukea mittaustuloksia, tutustumatta laitteen ohjekirjaan (esim. Agilent E1406-komentomoduli). Jos tarvitaan nopeaa tiedonsiirtoa, väylävaihtoehtoina on MXI, Firewire ja USB. Näistä USB- ja myös yhä useammin Firewire-liitännät löytyvät vakiona tavallisista tietokoneista. Kuvassa 2.13 on esitelty eri vaihtoehtoja VXI-järjestelmän ohjaamiseksi.



**Kuva 2.13** VXI-järjestelmän ohjaaminen

VXI-mittauslaitetta kalibroitaessa voidaan kyseinen yksikkö tarvittaessa irrottaa alkuperäisestä kehikosta ja siirtää se kalibrointilaboratorion omaan laitekehikkoon. Teollisuuden VXI-laitekehikot ovat usein suuria ja hankalasti siirrettäviä, joten pelkän moduulin siirtäminen onnistuu yleensä helpoimmin. Kalibrointia alkuperäisessä kehikossa saattaa hankaloittaa myös VXI-järjestelmän ulkoiset johdotukset, esimerkiksi erilaisten releiden ja matriisien ulkoiset kytkennät muihin kehikon laitteisiin. Markkinoilla on myös kannettavia VXI-kehikoita, joiden siirtely on helppoa. Moduulien vaihtaminen on melko vaivatonta, sillä VXI-järjestelmän moduulit ovat pistoyksiköitä, eikä yhden kortin poistaminen haittaa muun laitteiston toimintaa.

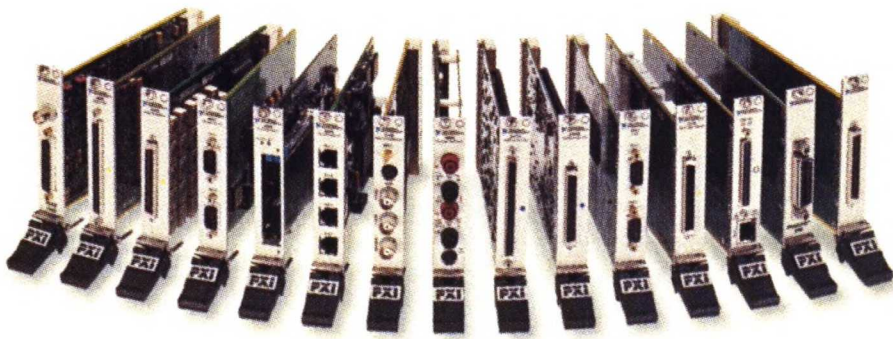


### 2.5.5. PXI

PXI (PCI Extensions for Instrumentation) määrittelee hyvin pienikokoisen modulaarisen PC-pohjaisen alustan mittaus-, testaus- ja automaatio-sovellutuksille. PXI perustuu nykyaikaisen tietokoneen PCI-tiedonsiirtoväylään ja siitä kehitettyyn CompactPCI:n spesifikaatioon, joka määrittelee PCI-väylän asennettuna mekaanisesti kestäväan, helposti asennettavaan ja muokattavaan kokonaisuuteen. PXI:n läheinen yhteys PCI-väylään alentaa laitteiden valmistuskustannuksia, edistää jatkuvasti suorituskykyä ja antaa mahdollisuudet käyttää suosittuja ohjelmistomalleja. [23]

Fyysisesti PXI-väylän laitteet ovat korttipohjaisia, kuten VXI-mittauslaitteetkin, mutta niiden koko on huomattavasti normaaleja VXI-laitteita pienempi. Tavallisen PXI-kortin kooksi on määritelty 3U PXI eli 100mm x 160 mm, joka vastaa pienintä VXI-kokoa A (jota ei juurikaan käytetä). PXI-kortti sisältää kaksi liitintä, joista J1 tarjoaa 32-bittisen PCI-tiedonsiirron ja J2 64-bittisen tiedonsiirron ja PXI:n ominaisuudet. PXI-kehikko sisältää systeemikorttipaikan ja maksimissaan seitsemän oheislaitepaikkaa. Systeemikorttipaikka sijaitsee kehikon vasemmassa reunassa ja tarvittaessa se voi viedä useamman korttipaikan. Systeemikorttipaikkaan voidaan asentaa sisäänrakennettu tietokone tai väyläkortti ulkoiselle tietokoneelle. Kytkentä ulkoiselle tietokoneelle on melko yksinkertainen, sillä väylät ovat käytännössä melko samanlaisia. Toinen korttipaikka vasemmalta lukien on varattu ns. tähtiliipaisukontrollerille, mutta sitä voidaan käyttää myös normaalina oheislaitepaikkana. Tähtiliipaisukontrolleri pystyy tuottamaan erilliset liipaisusignaalit väylän jokaiselle laitteelle. [24]

National Instrumentsin tekemän tutkimuksen mukaan kaupallisten PXI-laitteiden saatavuus on parantunut nopeammin kuin VXI-laitteiden saatavuus, kun sen standardi julkistettiin [23]. PXI-järjestelmän tiedonsiirtonopeus on maksimissaan 264 Mt/s, joka tekee siitä erään tämän hetken nopeimmista mittauslaitejärjestelmistä (VXI:n maksiminopeus 80 Mt/s). PXI-väylän edut tulevat esille varsinkin vaativissa reaaliaikamittauksissa, esimerkiksi konenäkösovellutuksissa ja liikkeenohjauksessa. PXI-järjestelmä ja sen mittauslaitteet ovat lisäksi VXI-järjestelmää sen laitteita edullisempia. Kuvassa 2.14 on esimerkkejä erilaisista PXI-korteista.



**Kuva 2.14** Erilaisia PXI-kortteja



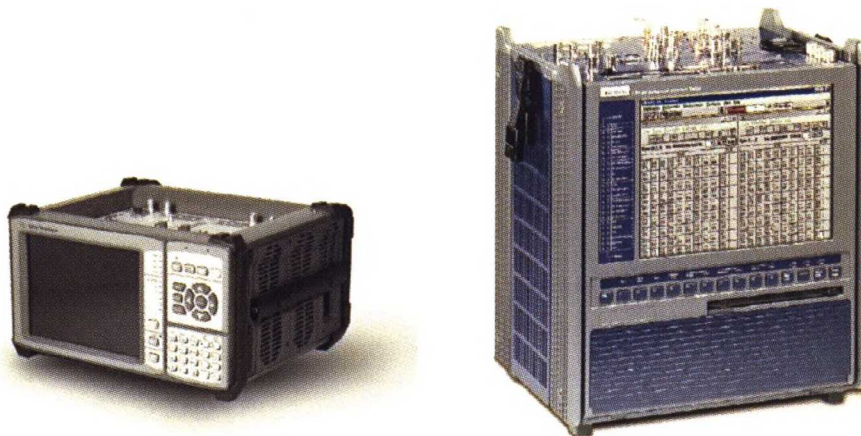
### 2.5.6. LAN

Uusimmissa mittauslaitteissa on yleistynyt muiden tavallisten ohjausmenetelmien lisäksi mahdollisuus ohjata laitteita lähiverkon (LAN) kautta. Tällaisia laitteita ovat mm. Agilent:n SDH/PDH-analysaattori J2126A ja Acternan tietoverkkoanalysaattori ANT-20 (kuva 2.15). Tyypillisesti laitteita ohjataan GPIB-väylän kautta, jolloin kontrollerina toimivassa tietokoneessa täytyy olla erillinen GPIB-sovitinkortti. Lähiverkkokortti on nykyään vakiona lähes jokaisessa toimistotietokoneessa, joten erillistä korttia ei tarvitse hankkia. Lähiverkon kautta tapahtuvalla ohjauksella ei voida saavuttaa kaikkia GPIB-väylän hyviä ominaisuuksia, kuten keskeytyksiä, mutta yksinkertaiseen asetusten asettamiseen ja tulosten lukuun se soveltuu mainiosti. LAN-liitännän avulla ohjaus voidaan hajauttaa vaikka toiselle puolelle maailmaa, jos näin on tarpeen tehdä. Lisäksi lähiverkon mittauslaitteiden määrää ei ole käytännössä rajoitettu. Ahtaissa paikoissa GPIB-kaapeleiden paksu koko saattaa aiheuttaa ongelmia, jotka voidaan välttää LAN-liitännällä, joka yksinkertaisimmillaan tarvitsee tiedonsiirtoon vain kaksi parikaapelia.

Lähiverkon kautta tapahtuva ohjaus perustuu TCP/IP-pohjaiseen liikenteeseen. Protokollapinoa voidaan kuvata ISO:n määrittelemällä OSI-mallilla (Open Systems Interconnect). Jotta mittauslaitteita voitaisiin ohjata normaalissa lähiverkkoympäristössä, tarvitaan seuraavat protokollat implementoituna mittauslaitteisiin:

- TCP (OSI-mallin kerrokset 4-5)
- IP (OSI-mallin kerros 3)
- Ethernet (OSI-mallin kerrokset 1-2)

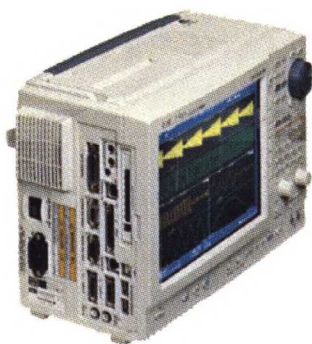
Ethernet voi olla tyypiltään 10BASE-T tai 100BASE-T eli 10 Mbit/s tai 100 Mbit/s maksimitiedonsiirtonopeuden tarjoava verkko kierrettyillä parikaapeleilla. Ethernet toimii laitteiden verkkokorttien fyysisillä osoitteilla, joita ei voi muuttaa. Jotta liikenne toimisi lähiverkon eri segmenttien välillä, tarvitaan IP-protokolla, joka määrittelee jokaiselle laitteelle IP-osoitteen, jonka ei tarvitse olla globaalisti ainutkertainen. TCP vastaa viestien perillemenosta sekä niiden oikeasta järjestyksestä ja viestien mahdollisesta uudelleenlähetyksestä.



**Kuva 2.15** LAN-liitännällä varustettuja mittauslaitteita (J2126A, ANT-20)

### 2.5.7. Muut ratkaisut

Muut väylätyypit varsinaisissa kalibroituissa mittauslaitteissa ovat melko harvinaisia. Uusista väylätyypeistä voidaan mainita USB (Universal Serial Bus) ja Firewire (IEEE 1394), joita on suunniteltu GPIB-väylän jatkajiksi. Näiden sarjaliikenteeseen perustuvien väylien avulla voidaan saavuttaa jopa satojen megabittien tiedonsiirtonopeus sekunnissa. Esimerkki USB-väylällä ohjattavasta mittauslaitteesta on Yokogawan oskilloskooppi DL750 (kuva 2.16). USB- ja Firewire-väylällä varustettujen mittauslaitteiden ohjaaminen vaatii aina erillisen laiteajurin, jonka valmistaja yleensä toimittaa laitteen mukana.



**Kuva 2.16** USB-liitännällä varustettu mittauslaite (DL750)

Markkinoilla on myös suoraan tietokoneeseen kytkettäviä mittauslaitteita, joita kutsutaan yleisesti DAQ-laitteiksi (Data Acquisition). Nämä laitteet voivat olla suoraan tietokoneen PCI-väylään kytkettäviä laitteita tai ne voivat sijaita erillisessä laitekehikossa, jota ohjataan tietokoneella. DAQ-laitteet tarvitsevat siis aina erillisen ohjaimen, joten niiden toimintaperiaatetta voidaan verrata esimerkiksi VXI-järjestelmään, joka tosin toimii tietokoneen sisällä. Yleensä DAQ-laitteet toimivat A/D-muuntimena sähköisen signaalin ja tietokoneen välillä, mutta ne voivat myös generoida signaalia ja analysoida digitaalista signaalia. Jos mitattava signaali ei ole sähköinen, mittaus suoritetaan sopivalla anturilla, jonka antama mittaussuure joudutaan yleensä muuttamaan sopivaksi sähköiseksi signaaliksi. Signaalia joudutaan vahvistamaan, linearisoimaan, suodattamaan ja eristämään muista signaaleista [21]. National Instrumentsin signaalinmuokkauslaitteita kutsutaan SCXI-laitteiksi (Signal Conditioning Extensions for Instrumentation), jotka ovat moduulipohjaisia erillisessä kehikossa, kuten PXI-laitteetkin.

DAQ- ja SCXI-laitteiden kalibrointi on yleisesti hieman hankalaa, sillä ne eivät ole itsenäisesti toimivia. Jos mittauskortti siirretään tietokoneesta toiseen, vaatii toimenpide lisäksi laitteen ajurien asennuksen. Mittauskorttien toiminta erilaisissa tietokoneissa pitäisi olla samanlaista, mutta ainakin käyttöjännitteiden tarkkuus ja stabiilisuus vaihtelee hyvinkin paljon eri tietokoneissa, millä voi olla merkitystä. Toisaalta kalibrointilaboratoriolla voi olla käytössään oma DAQ-laitteisto kalibrointikäyttöön. Tämän laitteiston toiminnan tarkkuutta on helpompi tarkkailla, sillä olosuhteet eivät muutu, jos kortti pidetään samassa tietokoneessa.



## 3. OHJELMISTO

### 3.1. Yleistä

Ohjelmistokehittimen valinnassa vaihtoehtoina olivat perinteiset yleiskäyttöiset ohjelmointikielet (C, C++, Visual Basic), tekstipohjainen HP Basic, graafinen HP VEE ja graafinen LabVIEW. Näistä LabVIEW on monipuolisin mittauslaitekäytössä ja samalla erittäin yksinkertainen käyttää. Ohjelmiston valinta oli melko selvää työn aloittamisesta saakka, sillä LabVIEW:stä saadut kokemukset ovat osoittaneet sen toimivaksi ratkaisuksi kalibrointitoiminnassa.

### 3.2. LabVIEW

LabVIEW on suunniteltu varta vasten mittauslaitekäyttöön ja tiedonkeruuseen, sille on saatavana mittauslaitteiden ohjaamiseen tarkoitettuja mittauslaiteajureita yli 2000 kappaletta. Ajurit auttavat ohjelmoijaa ohjelmoinnissa siten, ettei tutustuminen käsikirjoihin ole välttämätöntä. Ajurit sisältävät laitteiden ohjaamiseen tarvittavat väyläkäskyt. Suuri osa ajureista on tarkoitettu GPIB-väylätyypille, mutta myös muille väylille löytyy ajureita. Tuetut ohjausväylät mittauslaitteiden ohjaamiseksi ovat GPIB (IEEE 488.1 ja IEEE 488.2), sarjaliitäntä, VXI ja PXI. LabVIEW sisältää vakiona tuen myös DAQ-tiedonkeruu- ja signaalingenerointikortteille. DAQ-korttien avulla voidaan tehdä virtuaali-instrumentteja, joiden kontrollointi onnistuu siis vain PC:n avulla. Signaalingenerointikortteilla voidaan tehdä mm. mielivaltaisia aaltomuotoja, joiden tekeminen erillisellä mittauslaitteilla on melko hankalaa. Laitteiden ohjaaminen Ethernetin kautta on myös mahdollista, mutta sille ei ole tukea vakiona, joten ohjaukseen tarvittavat funktiot jouduttiin kehittämään itse.

LabVIEW:n avulla voidaan suorittaa mittaustuloksille hyvinkin vaativia matemaattisia operaatioita melko pienellä vaivalla. Esimerkiksi FFT-muunnoksen laskeminen oskilloskoopilta saadusta näytteestä on mahdollista valmiiden funktioiden avulla. Signaalia voidaan myös suodattaa digitaalisesti erilaisilla suodattimilla, joita ovat esimerkiksi Bessel, Butterworth, Chebyshev ja Parks-McClellan. Mittaustulosten analysointi on myös tehty mahdollisimman helpoksi ja LabVIEW sisältääkin valmiit funktiot mm. rajojen tarkasteluun aika- ja taajuustasossa, statistiikan laskemiseen (esim. keskiarvo, hajonta ja erilaiset jakaumat), erilaisten säröjen laskemiseen sekä tulosten integrointiin, differentiointiin ja interpolointiin. Statistiikan laskeminen on kalibroinnissa usein kiinnostavaa, sillä sen avulla voidaan arvioida osittain mittauserävarmuuden suuruus. Rajojen avulla voidaan todeta esimerkiksi jonkin pulssimuodon spesifikaatioidenmukaisuus. Mittaustulokset voidaan esittää perinteisesti numeerisesti yksitellen, taulukossa tai graafisesti kaksiulotteisesti tai kolmiulotteisesti. Tuloksia voidaan tarkastella mittaavalla tietokoneella ja uusimmilla LabVIEW-versioilla voidaan tuloksia ja koko mittaushjelman tilaa tarkastella www-selaimella internetin välityksellä. Tulokset voidaan tallentaa teksti-, html- tai binääritiedostoon, mutta Microsoftin kehittämän ActiveX:n avulla mittaustulokset voidaan tallentaa lähes mihin tahansa ohjelmaan, joka tukee ActiveX:ää. Näin tulokset voidaan tallentaa suoraan esimerkiksi Excel-tilukoon tai Word-dokumenttiin.

### 3.3. SCPI

Laitteiden ohjelmoinnin helpottamiseksi kehitettiin SCPI-kieli (Standard Commands for Programmable Instruments), jonka avulla samoilla käskyillä voidaan ohjata eri valmistajien laitteita. SCPI on kehitetty standardin IEEE 488.2 pohjalta ja sen tavoitteena on pienentää mittausohjelmistojen kehittämiseen kuluva aikaa yhdenmukaistamalla laitteiden ohjauksessa käytettäviä käskyjä. SCPI-kieli ei ota kantaa käytettävään ohjausväylään, vaan se määrittelee ainoastaan ohjauksessa käytettävän kielen syntaksin. Kieli pyrkii lisäksi vähentämään erityyppisiä keinoja ohjata mittauslaitteen samoja funktioita. Kun funktiot on määriteltä suoritettavaksi vain yhdellä tavalla, niiden ohjelmointi helpottuu huomattavasti. SCPI-kieli kehittyy jatkuvasti, sillä uudet mittauslaitteet synnyttävät uusia tarpeita komentojen suorittamiseksi. SCPI-yhteenliittymän jäsenet toimivat tiiviissä yhteistyössä taatakseen yhdenmukaisen komentokielen. [25]

Jotta mittauslaite olisi SCPI-yhteensopiva, on sen tuettava SCPI-kielen syntaksia, mutta myös lisäksi IEEE 488.2-standardia. Mikäli laitteessa ei ole IEEE 488.1-väyläliityntää, ei SCPI:n tarvitse myöskään tukea siihen liittyviä komentoja [16]. Komennot muodostavat hierarkkisen rakenteen, joka osaltaan selkeyttää ohjelmointia. Siirryttäessä ylemmältä tasolta alaspäin erottimeksi annetaan kaksoispiste ja eri käskyt erotellaan puolipisteellä. Komennot esitellään seuraavassa muodossa:

```
:FREquency
  [:CW]          <numeric_value>
    :AUTO        <Boolean>
  :CENTer        <numeric_value>
  :SPAN          <numeric_value>
```

Komennon isot kirjaimet muodostavat lyhyen muodon komennosta, jota voidaan tarvittaessa käyttää pitkän muodon sijasta. Hakasulkujen sisällä ilmaistaan komennon vapaavalintaiset osiot ja käskyn perässä mahdolliset parametrit. Käskyjä muodostaessa kirjainkoolla ei ole väliä. Hierarkian ensimmäisellä tasolla kaksoispistettä ei tarvitse käyttää. Laitteen tilaa voidaan kysellä päättämällä komento kysymysmerkillä. Keskitäajuus voidaan siis käskä laitteelle esimerkiksi jollain seuraavista komennoista:

```
:freq:cw 10000000
:FREQ:CW 10000000
freq:cw 10000000
freq 10000000
frequency 10000000
FREQUENCY 10000000
```

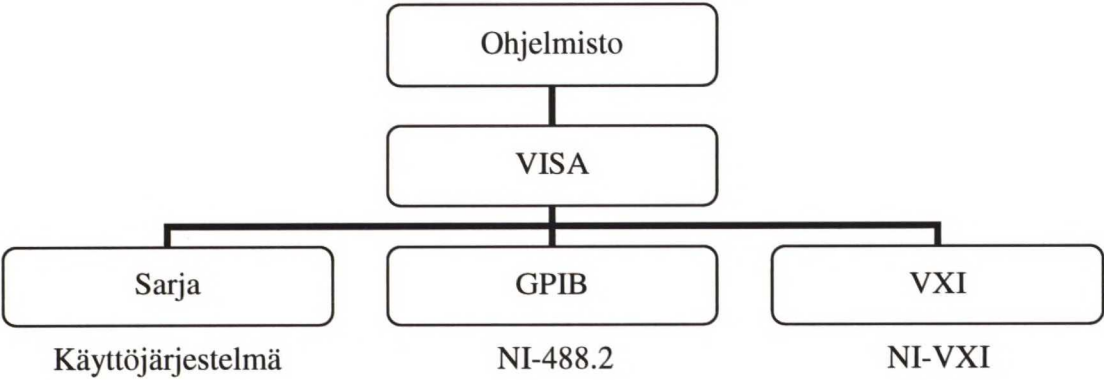
SCPI määrittelee yleisesti vain kaikkein yleisimmät yksiköt kuten tehon (W, dBm) ja amplitudin (V, dBV) ja muut yksiköt määritellään tapauskohtaisesti. Yksiköistä voidaan käyttää myös SI-järjestelmän kerrannaisyksiköitä, jolloin edellä muodostettu käsky voidaan ilmoittaa myös seuraavilla tavoilla:

```
freq 10 MHz
FREQUENCY:CW 10000 kHz
```



### 3.4. VISA

VISA (Virtual Instrumentation Software Architecture) on ohjelmallinen rajapinta mittausslaitteiden ohjaamiseksi. VISA:n avulla voidaan ohjata valmistajariippumattomasti VXI-, GPIB-, PXI- ja sarjaväylillä varustettuja laitteita, ilman suuria muutoksia ohjelmakoodiin (kuva 3.1). VISA on VXIplug&play Systems Alliance:n määrittelemä standardi, joka ei siis kuitenkaan ole rajoittunut VXI-väylään, vaan päinvastoin pyrkii tukemaan kaikkia suosituimpia väyliä. VISA sisältää ohjelmistorajapinnan lisäksi rajapinnan varsinaisiin väyliin. [16,21]



**Kuva 3.1** VISA-arkkitehtuuri

VISA:n avulla ohjataan laitteita niiden resurssien nimien perusteella. Koska VISA toimii ketjutetusti, resurssin nimi kulkee läpi komentoketjun ensimmäisestä komennosta viimeiseen, jolloin resurssin nimen vaihto riittää väylätyypin vaihtamiseksi ohjelmistossa. Jos laitteet tukevat vielä SCPI-kieltä, samat mittaukset suoritetaan aina samoilla käskyillä, jolloin mittauslaitteen vaihto erilaiseen aiheuttaa vain resurssin nimen vaihdon, jos sitäkään. Taulukossa 3.1 on lueteltu esimerkkejä laitteiden resurssien nimistä.

Nimi	Selitys
GPIB0::22::INSTR	GPIB-laite osoitteessa 22
GPIB0::9::17::INSTR	GPIB-laite primäärisessä osoitteessa 9, sekundäärisessä osoitteessa 17
ASRL1::INSTR	Sarjaliitäntä COM1-portissa
VXI0::8::INSTR	VXI-laite osoitteessa 8
PXI1::13::0::INSTR	PXI-laite toisessa PXI-kontrollerissa, primäärisessä osoitteessa 13

**Taulukko 3.1** Esimerkkejä VISA:n resurssien nimistä

Tässä työssä ei ole käytetty VISAa, sillä vanhempien laitteiden ohjaaminen sen avulla on melko hankalaa. VISA:n avulla ei voida esimerkiksi asettaa komennon lopettavaa merkkiä, joka vaihtelee juuri vanhemmilla mittauslaitteilla.

### 3.5. Ohjelmistokehityksen vaiheet

Ohjelmistokehityksen vaiheet pitävät yleensä sisällään ohjelmiston määrittelyn, suunnittelun, varsinaisen ohjelmoinnin, ohjelmiston testauksen, käyttöönoton ja ylläpidon. NPL esittää yleisen ohjelmistonkehittämisen laatujärjestelmän alaisena jaettavaksi seuraaviin iteratiivisiin toimenpiteisiin [26]:

1. Riskitason arviointi
2. Käyttäjien tarpeiden selvittäminen
3. Ohjelmiston spesifiointi
4. Ohjelmiston suunnittelu ja ohjelmointi
5. Ohjelmiston verifiointi
6. Ohjelmiston validointi
7. Loppukatselmus
8. Ohjelmiston toimitus käyttäjille
9. Ohjelmiston käyttö ja ylläpito

Toimenpidelistan lopusta joudutaan usein palaamaan kohti alkua, sillä ylläpito aiheuttaa muutoksia ohjelmistossa, jonka jälkeen ohjelmiston toiminta pitää verifioida ja validoida uudelleen. [26]

Riskitason arviointi tarkoittaa ohjelmiston kriittisyyden arviointia laboratorion toiminnalle sekä ohjelmiston kompleksisuuden arviointia. Tässä diplomityössä kehitetään ohjelmisto, joka tulee vähitellen korvaamaan kalibrointilaboratorion muut mittausohjelmistot, joten sen toimivuus on hyvin kriittistä. Ohjelma itsessään on osittain melko monimutkainen, mutta mittaustoimintoihin liittyvät osa-alueet ovat suhteellisen yksinkertaisia. Ohjelmisto toimii pohjana uusien kalibrointien luomiselle, joiden asetukset tallennetaan tekstitiedostoihin. Näiden toiminnan oikeellisuudesta vastaa kalibrointirutiinien tekijä, jonka on validoitava rutiinien toimivuus. Ohjelmiston yleinen riskitaso voidaan siis olettaa melko suureksi, siksi ohjelmistokehityksen kaikkiin osa-alueisiin kiinnitettiin huomiota työn edetessä.

Ohjelmiston spesifikaatiot määritellään täysin asiakkaan tarpeiden ja vaatimusten perusteella, jolloin epätarkat vaatimukset saattavat johtaa vääränlaisen ohjelmistoon. Spesifikaatiot toimivat koko ohjelmistokehityksen aikana ohjeena, jota on noudatettava mahdollisimman tarkasti. Asiakkaalta saadaan yleensä vain toiminnallinen määrittely, jossa kuvataan ohjelman toiminta ulkoisesti. Toiminnallinen määrittely ei ota kantaa ohjelman sisäiseen toimintaan, kuten käytettäviin tietorakenteisiin ja ohjelmiston arkkitehtuuriin, vaan nämä jäävät ohjelmoijan vastuulle. Yleisesti ohjelmisto kannattaa tehdä sellaiseksi, että siihen on mahdollista tehdä lisäyksiä ja muutoksia helposti jälkikäteen, jos ohjelmistolle asetetut vaatimukset muuttuvat.

Ohjelmoinnin päätteeksi valmistettu ohjelmisto testataan, jolloin saadaan varmuus ohjelmiston oikeasta toiminnasta. Verifiointilla todennetaan ohjelmiston ja spesifikaatioiden vastaavuus, sillä valmiin tuotteen tulee vastata asiakkaan vaatimuksia. Validoinnilla varmistetaan käytännössä, että ohjelmisto toimii näiden spesifikaatioiden mukaisesti. Kun asiakas on tyytyväinen valmistettuun ohjelmistoon loppukatselmuksen jälkeen, voidaan ohjelmisto toimittaa loppukäyttäjille.



### 3.6. Ohjelmiston laatu

Laatu määritellään tuotteen tai palvelun kyvyksi tyydyttää käyttäjän tarpeet ja odotukset. Tuotteen täytyy myös olla sopiva käyttötarkoitukseensa. Ohjelmistojen laadun kehittämiseksi ja mittaamiseksi on kehitetty ja kehitetään standardeja ym. menetelmiä, jotta tuloksena olisi kaikkien kannalta hyväksyttävä tuote. Standardi ISO/IEC 9126 määrittelee ohjelmistojen arvioitavat laatuominaisuudet seuraavasti [27]:

- Toiminnallisuus
- Luotettavuus
- Käytettävyys
- Tehokkuus
- Ylläpidettävyys
- Siirrettävyys

#### 3.6.1. Toiminnallisuus

Toiminnallisuus on toiminnoista ja niiden erityisominaisuuksista riippuva joukko ominaisuuksia. Toiminnot tyydyttävät määritellyjä tarpeita. Ohjelmiston ominaisuudet määrittelevät, mitä sen tarvitsee tehdä täyttääkseen sille asetetut tarpeet. Toiminnallisuus voidaan jakaa erillisiin osakokonaisuuksiin. Näistä sopivuus tarkoittaa ohjelmiston kykyä selviytyä sille tarkoitetuista toiminnoista. Tarkkuus määrittelee ohjelmiston ominaisuudet, jolla saadaan aikaan oikea tulos. Yhteensopivuus tarkoittaa ohjelmiston kykyä toimia yhteistyössä ulkoisten järjestelmien sekä normien ja lakien kanssa. Turvallisuus käsitteenä pitää sisällään ohjelmiston ominaisuudet, jolla estetään luvaton pääsy ohjelmaan tai sen tietoihin. Mukautuvuus tarkoittaa ohjelmiston kykyä mukautua noudattamaan sovellutukseen liittyviä standardeja ja määräyksiä. [28]

#### 3.6.2. Luotettavuus

ISO/IEC 9126:n määrittelemä luotettavuus tarkoittaa ominaisuutta, joka kuvaa ohjelmiston kykyä säilyttää toiminnallinen taso määritellyissä olosuhteissa ennalta määritellyn ajan. Standardin mukaan kypsyys on ohjelmistovirheiden aiheuttamien virhetilanteiden tiheys. Käytännössä mitä pidempään ohjelmisto on ollut markkinoilla, sen vähemmän siitä enää löytyy virheitä. Vikasietoisuudella tarkoitetaan ohjelmiston kykyä säilyttää toiminnallinen taso virhetilanteista huolimatta. Vioista toipuminen on ohjelmiston kyky palauttaa vikatilanteen edeltävä tila ja korjata mahdollisesti vioittuneet tiedot. [28]

Yleisesti luotettavuus pitää sisällään käyttövarmuuden, joka koostuu toimintavarmuudesta, kunnossapidettävyydestä ja kunnossapitovarmuudesta. Käyttövarmuus kuvaa kohteen kykyä suorittaa vaadittu toiminto määräoloissa vaaditulla ajan hetkellä tai aikavälillä olettaen, että ylläpitoresurssit ovat käytössä. Toimintavarmuus tarkoittaa kohteen kykyä suorittaa haluttu toiminto määräoloissa ja vaaditun ajan. Kunnossapidettävyydellä osoitetaan kohteen kyky pysyä määräoloissa toimintakunnossa tai siitä palautuminen määritellyllä tavalla. Kunnossapitovarmuus tarkoittaa tuotteen huollettavuutta määräoloissa ja määräajassa.

### 3.6.3. Käytettävyys

Standardi ISO 9241-11 määrittelee käytettävyyden eri tekijöitä ja mittareita näyttöpäätteiden parissa tapahtuvalle toimistotyölle. Määritelmässä käytettävyys esitetään kokonaisuudeksi, joka määrittää, miten hyvin tietyt käyttäjät tiettyssä tilanteessa voivat käyttää tuotetta tiettyyn tarkoitukseen. Standardin mukaan järjestelmän käytettävyyteen vaikuttaa järjestelmän käyttökonteksti, johon kuuluvat käyttäjä, käyttäjän tehtävät, käytettävät välineet ja laitteet sekä käyttöympäristö. Käytettävyyden mittareita ovat järjestelmän tuottavuus, tehokkuus ja tyytyväisyys. Tuottavuudella tarkoitetaan sitä, miten hyvin tietyt tehtävälle asetetut tavoitteet saavutetaan. Tehokkuudella tarkoitetaan suorituksen tehokkuutta, eli yleensä siihen kulunutta aikaa. Tyytyväisyys kertoo käyttäjän tuntemuksista ja kokemuksista järjestelmän palvelukykä kohtaan. [29]

Käytettävyys voidaan edelleen jakaa erilaisiin osakokonaisuuksiin. Nielsen esittää käytettävyyden jaon osatekijöihin seuraavasti [30]:

- Opittavuus
- Tehokkuus
- Muistettavuus
- Virheet
- Tyydyttävyys

Opittavuus ilmoittaa kuinka helppoa järjestelmää on oppia käyttämään ja hallitsemaan. Opittavuutta voidaan mitata aikana, joka kuluu tietyn osaamistason saavuttamiseen. Tehokkuudella viitataan tehokäyttäjän työskentelyn suoritustasoon, kun järjestelmä on opittu hallitsemaan. Tehokäyttäjät määritellään järjestelmäkohtaisesti, jonka jälkeen tehokkuutta voidaan arvioida ajan perusteella, joka menee tiettyjen tehtävien suorittamiseen. Uusien ja tehokäyttäjien lisäksi järjestelmällä voi olla satunnaisia käyttäjiä, joiden kohdalla tulee esiin järjestelmän muistettavuus. Muistettavuus mittaa järjestelmän käytön helppoutta, kun edellisestä käyttökerrasta on kulunut jo jonkin aikaa. Muistettavuutta voidaan arvioida käytettävyydestillä satunnaisten käyttäjien kanssa mittaamalla suoritukseen kuluvaa aikaa ja virheiden lukumäärää. Virheillä tarkoitetaan ohjelmiston virheitä ja toisaalta käyttäjän tekemiä virheitä. Virhetilanteista toipuminen pitää olla nopeaa, eikä vaarallisia virheitä saa syntyä lainkaan. Tyydyttävyys kuvaa järjestelmän käyttämisen miellyttävyyttä käyttäjän näkökulmasta. Tyydyttävyyttä voidaan mitata kysymällä käyttäjien mielipiteitä järjestelmästä ja sen käytöstä.

Käytettävyyden määritelmiä on esitetty monia muitakin, mutta monet jaottelut ovat hyvin samankaltaisia Nielsenin jaottelun kanssa. Muita osatekijöitä voivat olla mm. järjestelmän johdonmukaisuus, hallittavuus, tietojen sopiva esitystapa, tehtävään sopivuus sekä järjestelmän opastus näyttöruudulla ja ohjekirjoissa.

Ohjelmisto tehdään käyttäjiä varten. Jotta sille voidaan taata hyvä käytettävyytaso, on varsinkin sen käyttöliittymän suunnittelu tehtävä käyttäjäkeskeisesti. Käyttäjien tarpeiden, kykyjen ja mieltymysten huomioiminen suunnittelun eri osissa tulee ottaa huomioon. Käyttäjäkeskeisessä suunnittelussa keskitytään käyttäjiin, heidän työhönsä ja työympäristöönsä ja siihen miten teknologiaa voidaan parhaiten hyödyntää käyttäjien työn ja tehtävien tukemiseen [31]. Järjestelmän suunnittelu tulisi siis tehdä käyttäjien tarpeiden, ei järjestelmän tarpeiden mukaan.



## Käytettävyyden arviointimenetelmiä

Järjestelmän käytettävyyttä tulee arvioida koko suunnittelu- ja toteutusvaiheen ajan. Tällä menettelyllä voidaan taata, että käytettävyys otetaan huomioon merkittäviissä suunnittelupäätöksissä, jolloin käytettävyyden tavoitteet voidaan lopulta saavuttaa. Käytettävyyttä voidaan arvioida useilla menetelmillä, jotka voidaan jakaa karkeasti menetelmiin, joissa tarvitaan järjestelmän käyttäjiä ja niihin, joissa heitä ei tarvita.

Käytettävyydesti on tulevan järjestelmän käyttäjän kanssa tehtävä käytettävyyden arviointimenetelmä. Käytettävyydestissä käyttäjän annetaan työskennellä tulevan ohjelmiston kehitysversion parissa, jolloin on tarkoitus löytää erilaisia ongelmakohtia järjestelmässä. Testille laaditaan tarkka suunnitelma, jonka mukaan käyttäjä ohjeistetaan. Käytettävyydesti pyritään tekemään yleensä laboratorio-olosuhteissa, jolloin testi on toistettavissa. Tilastollisin menetelmin voidaan erotella tuloksista ohjelmiston ongelma-alueet, jotka saattavat vaihdella johtuen koehenkilön tottumuksista ja kokemuksesta.

Toinen käytettävyyttä arvioiva menetelmä on käyttäjän havainnointi. Tämän tyyppisessä menetelmässä käyttäjän toimintaa seurataan tarkasti ja käyttäjää pyydetään ajattelemaan ääneen. Testi videoidaan ja tapahtumat tietokoneella taltioidaan, jolloin ongelmakohdissa saadaan selville mitä käyttäjä on yrittänyt tehdä ja mitä hän on silloin ajatellut. Havainnointi on yleensä kuitenkin hankalasti järjestettävissä ja siihen menee runsaasti aikaa ja rahaa. Testi tehdään käyttäjän todellisessa työympäristössä, jolloin tulokset ovat luotettavampia kuin laboratoriossa suoritettut testit.

Yksi tapa selvittää ohjelmiston ongelmakohtia on haastatella sen käyttäjiä tai suorittaa kysely aiheesta. Haastattelut voidaan suorittaa suullisesti tai kirjallisesti. Vapaamuotoisissa sanallisissa haastatteluissa voidaan paneutua kunkin käyttäjän omiin ongelmakohtiin syvällisemmin, jolloin on mahdollista löytää ongelmia, joita ei olisi ollut muutoin mahdollista huomioda. Kyselyt voidaan suorittaa lomakkeilla, joissa käyttäjän annetaan arvioida ohjelman eri ominaisuuksia. Kirjallisten kyselyjen analysointi on huomattavasti helpompaa kuin suullisten haastatteluiden analysointi.

Kognitiivinen läpikäynti on menetelmä, jossa ei tarvita tulevan järjestelmän käyttäjien avustusta. Sen avulla tutkitaan järjestelmän opittavuutta suorittamalla järjestelmään liittyviä tyypillisiä tehtäviä, siten kuin ne olisi tarkoituskin suorittaa. Tehtävien eri vaiheiden aikana kerätään tietoa seuraavista mahdollisista ongelmakohdista:

- Onko käyttäjällä järjestelmän kannalta oikea tavoite?
- Löytääkö hän järjestelmästä oikean toiminnon?
- Yhdistääkö hän kyseisen toiminnon tavoitteeseensa?
- Mikäli oikea toiminto on suoritettu, saako käyttäjä riittävästi palautetta tehtävän etenemisestä?

Esiin tulleet ongelmat kirjataan muistiin, mutta tehtävän suorittamista jatketaan eteenpäin aivan kuin käyttäjä olisi toiminut siihen saakka oikein. Kognitiivinen läpikäynti on edullista ja helppoa toteuttaa, mutta ei kerro täyttä totuutta, koska varsinainen käyttäjä ei ole testissä edustettuna.

Heuristisessa arvioinnissa tarkastetaan ohjelmiston käyttöliittymän osat erilaisten käytettävyyssperiaatteiden mukaisesti. Arvioinnissa voidaan käyttää järjestelmän prototyyppiä tai käyttöliittymän suunnitelmia, jolloin käytettävyyttä voidaan arvioida jo ohjelmistotuotannon alkuvaiheessa. Heuristinen arviointi on tapa etsiä käyttöliittymän ongelmakohtia ilman varsinaisia käyttäjiä, nopeasti ja edullisesti. Menetelmä ei ota kantaa ohjelman soveltuvuuteen sille tarkoitettuun tehtävään tai sen hyödyllisyyteen, sen tarkoituksena on vain arvioida käyttöliittymän käytettävyyttä. Ainakin ohjelmiston loppuarviointi kannattaa tehdä yhteistyössä käyttäjien kanssa.

Heuristisessa arvioinnissa käytetään yleensä apuna Nielsenin ja Molichin kymmentä sääntöä [30], jotka ovat yleisiä ohjeita käytettävyyden ylläpitämiseksi:

1. Käytä yksinkertaista ja luonnollista dialogia
2. Käytä käyttäjien omaa kieltä
3. Minimoi käyttäjän muistikuorma
4. Tee käyttöliittymästä kauttaaltaan yhdenmukainen
5. Anna käyttäjälle palautetta toiminnoista
6. Anna selkeä poistumistapa eri tiloista ja toiminnoista
7. Anna käyttäjälle mahdollisuus käyttää oikopolkuja
8. Anna virhetilanteista selkeät virheilmoitukset
9. Vältä virhetilanteita
10. Anna riittävä ja selkeä apu ja dokumentaatio

Näiden sääntöjen mukaan käyttöliittymän pitäisi olla mahdollisimman yksinkertainen, joten kaikki tarpeeton tulisi jättää siitä pois. Harvoin tarvittavat toiminnot tulisi piilottaa siten, etteivät ne turhaan ole näytöllä koko aikaa. Käyttäjän muistikuorman minimoimiseksi ohjelmiston tulisi antaa vaikkapa valikosta eri vaihtoehtoja jonkin toiminnon suorittamiseksi, jolloin käyttäjän on tarvitse muistaa niitä kaikkia. Yhdenmukaisuus käyttöliittymän eri toiminnoissa tukee osaltaan ohjelmiston käytettävyyttä, jolloin käyttäjällä on aina yksi tapa suorittaa jotkin samankaltaiset toiminnot. Ohjelman edistymisestä on hyvä antaa palautetta käyttäjälle, jolloin hän tietää menikö hänen antamansa komennot perille. Eräs periaate on 0,1/1/10-sääntö, jonka mukaan tehtävän kestäessä alle 0,1 sekuntia käyttäjällä on tuntemus välittömästä palautteesta. Tehtävän suorituksen kestäessä noin sekunnin käyttäjän keskittyminen ei vielä häiriinny, mutta hän huomaa selvästi viiveen. Tätä pidemmällä viiveillä käyttäjälle pitäisi kertoa, että jotain tapahtuu. Kymmenen sekuntia pidempään kestäville toiminnoille pitäisi antaa jonkinlainen arvio tehtävän etenemisestä. Kun ohjelmistoa opitaan käyttämään tehokkaasti, käyttäjän työskentelyä helpottaa erilaiset oikopolut ohjelmistossa. Oikopolut voivat olla näppäinyhdistelmiä, hiiren kaksoispainalluksia tai komentojen lyhenteitä. Eräs tärkeä piirre ohjelmistoissa on niiden virheiden käsittely. Liian monessa ohjelmistossa virheisiin ei varauduta ja niistä ilmoitetaan käyttäjälle mitä erilaisimmin kryptisin koodein. Virheilmoitus ”ohjelma on suorittanut virheellisen toiminnon #127512 ja se on suljettava” ei kerro käyttäjälle mitään, vaan ohjelman pitäisi kertoa selkeästi mitä on tapahtunut ja miksi. Tietenkin kaikkia virhetilanteita on vältettävä viimeiseen asti. Jos järjestelmä on suunniteltu ja toteutettu hyvin, ei erillisiä opasteita ohjelmiston käyttämiseksi tarvita. Usein on kuitenkin tarpeen antaa käyttäjälle apua ohjelman eri tilanteissa erimerkiksi erillisellä *ohje*-painikkeella. Ohjeiden paperiversiosta on lisäksi tehtävä mahdollisimman selkeä ja hyvin jäsennelty kokonaisuus.



### 3.6.4. Tehokkuus

Ohjelmiston tehokkuus on joukko sen ominaisuuksia, jotka ennalta määritellyissä olosuhteissa kuvaavat ohjelmiston suorituskyvyn suhdetta käytettyihin resursseihin. Käyttäjän kannalta tehokkuutta voidaan mitata tiettyjen toimintojen suorittamiseen kuluvana aikana. Ohjelmiston kannalta tehokkuutta voidaan mitata sen kuluttamien resurssien mukaan ja sen nopeutena suorittaa erilaisia tehtäviä. Resurssit voivat tarkoittaa käytettyä muistitilaa, tallennuskapasiteettia tai prosessori-aikaa, mutta niillä voidaan viitata myös käytettyihin ylläpito- ja tukihenkilöstöpalveluihin.

### 3.6.5. Ylläpidettävyys

Ylläpidettävyydellä viitataan ohjelmiston ominaisuuksiin, jotka riippuvat sen muutoksiin tarvittavan työn määrästä. Muutokset voivat olla ohjelmiston korjauksia, päivityksiä tai parannuksia. Ohjelmiston vaatimukset voivat muuttua, jolloin myös ohjelmistoa on luultavasti muutettava. YlläpidettävyYTEEN liittyy ohjelmiston rakenteellinen selkeys ja johdonmukaisuus. Lisäksi hyvin kommentoitua ohjelmistoa on helppo muuttaa, koska muuttamiseen tarvittavat tiedot ovat heti saatavilla. Ohjelmiston ylläpidettävyYTEEN liittyy myös sen testattavuus ja tehtyjen muutosten rajautuminen määriteltyihin kohtiin ohjelmistoa.

### 3.6.6. Siirrettävyys

Ohjelmiston siirrettävyydellä tarkoitetaan ominaisuuksia, jotka määrittelevät ohjelmiston kyvyn olla siirrettävissä eri ympäristöihin, joita voivat olla erilaiset organisaatio-, laitteisto- tai ohjelmistoympäristöt. Ohjelmistoa voidaan joutua siirtämään eri yrityksestä toiseen, jolloin on huomioitava yrityksen erilaiset tarpeet. Ohjelmistoilla on aina jonkinlaiset laitteistovaatimukset, jolloin siirrettäessä ohjelmistoa fyysisesti tietokoneesta toiseen, on varmistettava ovatko nämä vähimmäisvaatimukset täytetty. SiirrettävyyTEEN liittyviä käsitteitä ovat mukautumiskyky erilaisiin ennalta määriteltyihin ympäristöihin, asennettavuus, yhteensopivuus ja korvattavuus jollain toisella ohjelmistolla.

### 3.6.7. Mitattavat laatuominaisuudet

Yleisesti ohjelmiston laatuominaisuudet ovat melko hankalasti mitattavissa, minkä takia ohjelmistojä arvioidaan usein vain edellä mainituilla subjektiivisilla arvioilla. Mitattavia laatuominaisuuksia ovat mm. ohjelmiston virheiden määrä ja niistä mahdollisesti aiheutuvat kustannukset. Toisaalta, jos kaikki virheet voitaisiin laskea, luultavasti ne voitaisiin myös korjata. Tuloksena olisi täydellinen ohjelma, jota tuskin on olemassakaan. Virheiden määrää voidaan kuitenkin arvioida esimerkiksi jonkin tietyn osan virheiden määrän perusteella tai virheinä aikayksikköä kohti. Virhetilanteisiin liittyy oleellisesti käsite MTBF (Mean Time Between Failures), joka ilmoittaa keskimääräisen ajan vikojen välillä, MTTF (Mean Time to Failure), joka on keskimääräinen vikaantumisaika sekä MTTR (Mean Time To Repair), joka tarkoittaa keskimääräistä toipumisaikaa vikatilanteesta. MTBF on määritelty MTTF:n ja MTTR:n summaksi.

### 3.6.8. Versionhallinta

Versionhallinnan tavoitteena on tietää ohjelmiston ja sen eri komponenttien nykyinen versio ja niiden tilat. Versionhallinnan avulla jokainen muutos ohjelmistoon on kirjattu päivämäärineen, jolloin on mahdollisuus palata takaisin tiettyinä päivinä suoritettuun ohjelmaan. Tällaisen menettelyn tuloksena ohjelmiston virheistä johtuvat väärät tulokset voidaan jäljittää tarkasti.

## 3.7. Ohjelmiston testaus ja validointi

Ohjelmiston testauksella pyritään löytämään suunnitelmallisesti mahdollisimman paljon virheitä ohjelmakoodista, jotta ne voitaisiin korjata. Tavallisesti ohjelmiston testausta suoritetaan jatkuvasti ohjelmistoa kehitettäessä, jotta sen oikea toiminnallisuus voidaan todeta jo aikaisessa vaiheessa. Ohjelmiston virheet voivat johtaa vikatilanteeseen, josta voi aiheutua jonkin asteinen järjestelmän häiriö. Häiriöt eivät ole välttämättä aina edes ulospäin huomattavissa, mutta joskus ne voivat johtaa koko tietokonejärjestelmän halvaantumiseen.

Standardi ISO 9000-3 esittelee yleisiä ohjeita ohjelmistojen kehittämiseen, jakeluun, asennukseen ja niiden huoltoon. Standardi jakaa ohjelmiston testauksen eri testaustasoihin, joita ovat moduulitestaus, integrointitestaus ja järjestelmätestaus. Näistä moduulitestaus on alimman tason testausta, kun taas järjestelmätestaus on koko järjestelmän kattavaa testausta. Standardi mainitsee lisäksi myös kenttätestauksen ja hyväksymistestauksen. [32]

Moduulitestauksen kohteena on moduulin sisäinen toiminta, esimerkiksi jonkin funktion toiminnan testaaminen. Moduulit ovat tässä tapauksessa ohjelmiston kaikkein alimpia toimintoja, jotka ovat mahdollisimman riippumattomia muista ohjelmiston osista. Moduulien testaus suoritetaan yleensä heti, kun moduuli on saatu valmiiksi.

Integrointitestauksessa testataan eri moduulien yhdistämistä ja niiden yhteensopivuutta. Testausta suoritetaan usein rinnakkain moduulitestauksen kanssa ja testauksen tavoitteena onkin löytää moduulien rajapintojen väliset virheet. Integrointitestaus voidaan suorittaa eri kahdella menetelmällä: ns. top down- ja bottom up -menetelmällä.

Top down -testaus aloitetaan ylimmältä ohjelmistotasolta ja siirrytään hierarkiassa vähitellen alaspäin. Tällä menetelmällä saadaan testattua ensimmäisenä kriittisimmät komponenttirakenteet, mutta toisaalta yksityiskohtien tarkastelu jätetään viimeiseksi. Bottom up -testauksessa aloitetaan hierarkian alimmista moduuleista ja siirrytään sieltä ylöspäin. Tällä testaustyyppillä saadaan tarkistettua alimman tason ohjelmiston toiminta ensimmäisenä, jolloin esimerkiksi ulkoisten laitteiden rajapintojen toiminta saadaan varmistettua heti ensimmäiseksi. Menetelmällä valmiin ohjelmiston kokonaiskuva ja kokonaisuuden ongelmat paljastuvat vasta testauksen lopussa.



Järjestelmätestauksessa keskitytään testaamaan koko ohjelmistoa. Tässä vaiheessa oletetaan, että moduuli- ja integrointitestaus on suoritettu, jolloin voidaan keskittyä ohjelman toimivuuteen kokonaisuutena. Varsinaisia virheitä ei tässä vaiheessa saisi enää esiintyä. Ohjelmistoa tai sen käyttöohjetta voidaan verrata tällöin asiakkaan asettamiin määrittelyihin, jolloin voidaan todentaa ohjelmiston spesifikaatioiden mukaisuus. Tällaista testausta kutsutaan usein hyväksymistestaukseksi, joka suoritetaan ennen järjestelmän toimitusta asiakkaalle.

Toiminnallisessa testauksessa tarkastetaan, että ohjelma toimii käyttäjän kannalta oikein. Tällöin ei kiinnitetä huomiota ohjelmakoodin toimintaan, kunhan lopputulos on oikea. Rakenteellisessa testauksessa testataan ohjelmistoa sen varsinaisen koodin perusteella ohjelmiston omia ehto- ja toistolauseita suorittamalla. Rakenteellisessa testauksessa testitapausten määrä kasvaa helposti suureksi.

Ohjelmiston testausta ei voida suorittaa täydellisesti äärellisessä ajassa, vaikka syöteavaruus pidettäisiinkin äärellisenä. Testit tulee valita siten, että niiden avulla löydetään todennäköisesti suurin osa järjestelmän virheistä. Ohjelmiston haarat eri syötearvoilla saavat aikaan suuren testiavaruuden, jota yleensä rajoitetaan joihinkin kiinnostaviin tapauksiin. Ohjelman syötteiksi voidaan valita muutamia arvoja seuraavista luokista: kelpolliset syötteet, liian pienet tai liian suuret syötteet tai epäkelvot syötteet. Ohjelmiston haarojen testaus tulee suorittaa siten, että erilliset testit eivät mene päällekkäin, jotta vältytään testaamasta samoja asioita samoilla tavoilla. [28]

Ohjelmiston validoinnilla tarkoitetaan sen toiminnan tarkastamista siten, että se toimii asetettujen spesifikaatioiden mukaisesti. ISO/IEC 17025 vaatii käytettävän kalibroitiohjelmiston validointia (kohta 5.4.7.2), jolla tarkistetaan ohjelmiston soveltuvuus käyttötarkoituksensa [2]. Käytännössä tarkistetaan ovatko ohjelmiston avulla saadut kalibroinnin tulokset samoja kuin manuaalisesti suoritettun mittauksen tulokset. Tulosten tarkastelussa on huomioitava mittausepävarmuuden merkitys.

## 4. KALIBROINTIOHJELMA

Ohjelmistoprojektin tavoitteena oli saada aikaan ohjelma, jonka avulla voidaan tehdä helposti ja nopeasti kalibrointirutiineja erilaisille mittauslaitteille. Tuloksena syntyi ohjelmisto, joka ei ole rajoittunut mihinkään yksittäiseen teknologiaan, vaan sitä voidaan käyttää lähes mielivaltaisten mittauslaitteiden kalibroinneissa.

### 4.1. Vaatimukset

Kalibrointiohjelmiston vaatimukset määriteltiin vanhojen ohjelmistojen hyvien ja huonojen ominaisuuksien perusteella sekä kalibrointiohjelmia käyttävien henkilöiden kokemusten ja tottumusten perusteella. Selvittelyn tuloksena syntyi ohjelmiston raakaversio, joka sisälsi ainoastaan ohjelmiston käyttöliittymän ja siitäkin vain tärkeimmät ikkunat. Tämän ohjelmistoversion avulla käyttäjille annettiin mahdollisuus kommentoida tulevaa kalibrointiohjelmistoa. Kommenttien yhteenvetona laadittiin ohjelmistolle lopulliset vaatimukset.

#### 4.1.1. Toiminnalliset vaatimukset

Tärkein ohjelmistolle annettu vaatimus oli mahdollisimman laaja käytettävyys eri mittauslaitteiden kalibroinnissa. Ohjelmiston käyttäjälle haluttiin antaa melko vapaat kädet luoda minkälaisia mittausrutiineita tahansa. Ohjelmistoon haluttiin ominaisuus käyttää yleisimpiä ohjausväyliä, jotka ovat:

- GPIB-väylä
- RS-232C -liitäntä
- Lähiverkko-liitäntä
- VXI-väylä

Näiden väylien lisäksi ohjelmiston haluttiin toimivan myös ohjausväylättömien mittauslaitteiden kanssa. Tällöin kyseessä on manuaalinen mittautyyppi, jolloin tietokone neuvoo käyttäjää asetuksissa ja kyselee mittautuloksista. Manuaalisessa mittauksessa voidaan käyttää myös sellaisia mittauslaitteita, joissa on jokin ohjausväylä, jota ei kuitenkaan ole määritelty kalibrointiohjelmistoon.

Laboratorion vanhemmissa mittausohjelmistoissa ei ollut mahdollisuutta muokata asetuksia ohjelmiston ulkopuolella, mikä aiheutti monenlaisia rajoituksia. Tämän vuoksi uuden kalibrointiohjelmiston haluttiin tallentavan kaikki asetukset normaaleihin tekstitiedostoihin, jotta niiden muokkaus olisi helppoa myös ulkopuolisilla ohjelmilla. Suurien mittautaulukoiden muokkaaminen onnistuu huomattavasti helpommin Excelillä kuin LabVIEW:n omalla taulukkoeditorilla. LabVIEW ei anna mm. mahdollisuutta lisätä ja poistaa sarakkeita ja rivejä taulukon keskeltä. Lisäksi tekstitiedostoihin tallennetut asetukset voidaan helposti kopioida toiseen hakemistoon, jolloin hyvin toimivaa kalibrointirutiinia voidaan hyödyntää muiden vastaavien laitteiden kalibrointien pohjana.



Ohjelmistoon haluttiin myös haku kalibroitaville laitetyppeille. Ohjelmiston raakaversiossa laitetypit sijaitsivat laiteryhmiensä takana, jolloin yksittäisen laitetypin hakeminen oli hankalaa, jos laiteryhmästä ei ollut tietoa. Haun haluttiin lisäksi näyttävän reaaliaikaisesti kirjoitetuilla merkeillä löytyvät laitetypit ilman erillistä *hae*-painikkeen valintaa.

Kalibroinnissa haluttiin mahdollisuus suorittaa kaikki mittaukset yhdellä kertaa, jos mittauskytkentä eri mittauksissa olisi sama. Tämä nopeuttaa kalibroinnin suorittamista huomattavasti. Toisaalta ohjelmiston haluttiin myös tarvittaessa pysähtyvän eri mittausten välille, jolloin tuloksia ehtisi tarkastelemaan. Lisäksi ohjelmistoon kaivattiin ominaisuutta suorittaa jo kerran suoritettu mittaus uudelleen. Kalibroinnin edetessä ohjelmiston haluttiin ilmaisevan jotenkin mitä solua ollaan suorittamassa ja arvio mittauksen kestosta.

Ohjelmistoon haluttiin ominaisuus kokeilla muokattua väyläasetustiedostoa samassa ikkunassa, jossa asetukset määritellään. Tällöin käskyjen toimivuuden kokeilu onnistuu heti ja kokeilun tulokset on tällöin käytännössä validoitu. Samanlaista ominaisuutta haluttiin myös *kalibrointien mittauspisteet* -ikkunalle, jossa muokattua kalibrointia voitaisiin heti kokeilla.

Kalibrointiohjelmiston haluttiin tarvittaessa suorittavan matemaattisia operaatioita mittaustuloksille, esimerkiksi mittaustulosten normalisointia tai vertailua referenssarvoihin. Mittaustuloksien muotoiluun haluttiin päästä vaikuttamaan, sillä edellisten ohjelmistojen mittaustulokset olivat liian usein sidottuja johonkin tiettyyn desimaalimäärään ja kerrannaisyksikköön. Lisäksi ohjelmiston pitäisi ymmärtää mittaustuloksen minimi- ja maksimiarvot, joiden vertailua pitäisi suorittaa mitattuun tulokseen. Ohjelmiston pitäisi antaa jokin ilmoitus, jos mittaustulos ei täytä määriteltäviä vaatimuksia.

Mittaustuloksien tallentaminen tekstitiedostoon oli ehdoton edellytys ohjelmiston hyväksymiselle. Vanhimmat ohjelmistot eivät osanneet kuin tulostaa mittaustulokset paperille, joka johti yleensä huonosti muotoilluihin tuloksiin. Tekstitiedostoihin tallentamisen lisäksi ohjelmiston haluttiin myös tarvittaessa tallentavan tulokset laboratorion normaaliin kalibrointitodistusmalliin, joka oli Microsoft Word -muotoinen. Ohjelmiston haluttiin täyttävän dokumentin mahdollisimman pitkälle, eli ohjelmiston pitäisi osata täyttää todistukseen vähintäänkin laitteen tiedot, asiakkaan tiedot ja mittaustulokset. Näiden tietojen täyttämisen jälkeen lopun dokumentin muokkaus onnistuisi melko pienellä vaivalla. Ohjelmistolle olisi voitu luoda myös ominaisuus, jossa kaikille mittauslaitetyypeille olisi luoto oma todistus pohja, mutta tätä ei haluttu, koska tällöin dokumenttipohjien hallinta olisi käynyt liian hankalaksi. Tässä tapauksissa olisi saatettu joutua tilanteeseen, jossa yrityksen yhteinen dokumenttipohja olisi muuttunut, jolloin kaikkia tehtyjä kalibrointitodistuksen pohjia olisi jouduttu muuttamaan. Ohjelmistoon toivottiin myös ominaisuutta tallentaa tulokset Microsoft Excel -muotoon, jolloin tuloksien jatkomuokkaus olisi helppoa. Excelin avulla tuloksista voidaan esimerkiksi piirtää graafisia kuvaajia todistusta varten.

#### **4.1.2. Ei-toiminnalliset vaatimukset**

##### **Tekniset vaatimukset**

Ohjelmisto tarvitsee toimiakseen normaalin PC-tietokoneen, johon on asennettu jokin Microsoftin Windows-käyttöjärjestelmästä. Suositelluin käyttöjärjestelmä on Windows 2000, sillä ohjelmiston kehitys ja testaus suoritettiin tällä käyttöjärjestelmällä. Kalibrointiohjelmisto vaatii LabVIEW:n Run-Time -ohjelmiston, jonka versio on oltava vähintään 6.0. Jos mittaustuloksia halutaan tallentaa doc- tai xls-muotoon, on tietokoneeseen oltava asennettuna Microsoftin Office XP, jonka tulee sisältää ohjelmistot Word 2002 ja Excel 2002.

Kalibrointiohjelmisto vaatii tietokoneelta jonkin verran tehoa, mutta noin 300 MHz:n prosessorilla varustetun tietokoneen arveltiin riittävän ohjelmiston suorittamiseen. Muistia tietokoneessa pitäisi olla vähintään 64 Mt ja vähintään 128 Mt, jos käytetään Wordia tai Excelia.

Jos mittauslaitteita halutaan ohjata jonkin väylän kautta on tietokoneessa oltava sovitin kyseiseen ohjausväylään. Erityisesti GPIB- ja VXI-väylät vaativat erilliset lisälaitteet ja ajurit.

##### **Laadulliset vaatimukset**

Ohjelmistoa tehtäessä pidettiin kappaleen 3.6 laadulliset ominaisuudet mielessä. Varsinkin käytettävyyteen haluttiin panostaa, sillä ohjelmisto tulee monen käyttäjän päivittäiseksi työvälineeksi. Ohjelmistotyön päätteeksi ohjelmisto tuli validoida laatustandardin ISO/IEC 17025 vaatimalla tavalla, sillä tämän diplomityön aikana kalibrointilaboratoriolle myönnettiin akkreditointi suurtaajuisten sähkösuureiden kalibrointien osalta. Ohjelmistoa tullaan käyttämään todennäköisesti juuri suurtaajuisten suureiden kalibroinneissa, joten ohjelmiston toimivuus on erityisen tärkeää.



## 4.2. Ohjelman rakenne

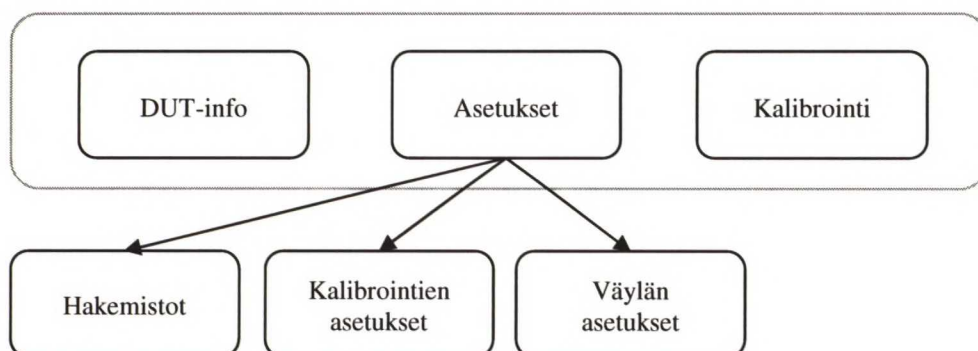
Ohjelma koostuu kolmesta osiosta: kalibroitavan laitteen tiedoista, asetuksista ja varsinaisesta kalibrointien suorittamisesta. Kuhunkin kohtaan siirrytään pääikkunasta (kuva 4.1) vastaavia painikkeita painamalla. Ohjelma pitää sisällään monia aliohjelmia, joiden toimintaa on kuvattu lyhyesti liitteessä 1.



**Kuva 4.1** Kalibrointiohjelman pääikkuna

Kalibrointiohjelman yksinkertaistettu rakenne on esitelty kuvassa 4.2. Pääikkunan painikkeesta *DUT-info* päästään valitsemaan kalibroitavan mittauslaitteen tyyppi sekä tarvittavat tiedot kalibrointitodistusta varten. Kun kalibroitavan laitteen tiedot on syötetty, voidaan kalibrointi aloittaa vastaavasta painikkeesta. Ennen kalibroinnin suorittamista käyttäjää pyydetään valitsemaan suoritettavat kalibroinnit ja kalibroinnin jälkeen käyttäjä voi tallentaa mittaustulokset halutussa tiedostomuodossa.

Asetukset jakautuvat edelleen kolmeen eri asetustyyppiin: *hakemistoihin*, *kalibrointien asetuksiin* ja *väylän asetuksiin*. Hakemistojen asetuksissa määritellään ohjelman tarvitsemien tiedostojen hakemistot, kuten esimerkiksi väyläasetuksien ja kalibrointien asetusten hakemistot. Kalibrointien asetuksissa määritellään kalibroitavien laitteiden mittausten asetukset. Väylän asetuksissa luodaan kaikille sellaisille mittauslaitteille, joita ohjelmassa halutaan käyttää, oma asetustiedosto. Tämä tiedosto pitää sisällään tiedot mittauslaitteen laiteryhmästä, laitetyypistä, valmistajasta, ohjausväylästä ja sen asetuksista sekä laitteen tunnistamista ohjauskäskyistä.



**Kuva 4.2** Kalibrointiohjelman yksinkertaistettu rakenne

### 4.2.1. DUT-info

*DUT-info*-ikkuna (kuva 4.3) sisältää tiedot kalibroittavasta mittauslaitteesta. Pakolliset tiedot kalibroitua varten ovat laiteryhmä, valmistaja sekä laitetyyppi. Muita tietoja käytetään tulosten tallennuksen ja kalibroitodistuksen luomisen yhteydessä. Kalibroittavan mittauslaitteen tyyppi voidaan vaihtaa painikkeella *vaihda*. Samalla vaihtuvat automaattisesti myös laiteryhmä ja valmistaja oikeiksi.

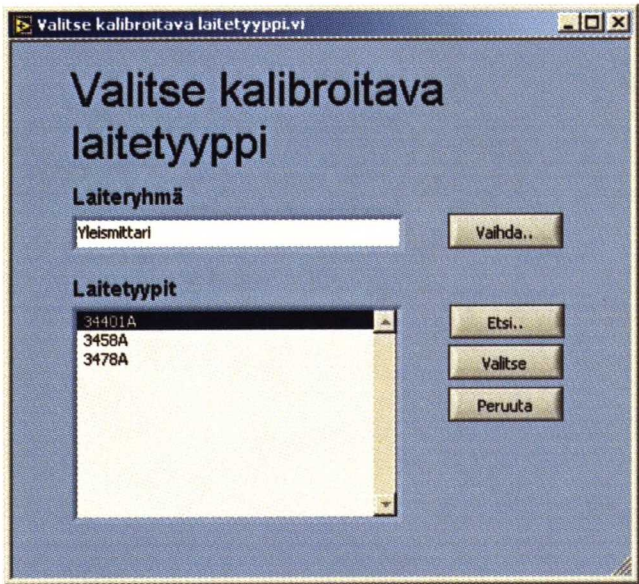
*Laitetyyppi*-kenttä on jätetty vapaasti muokattavaksi, sillä kalibroittavassa laitteessa saattaa olla useita yksiköitä, jotka voidaan yksilöidä tähän kenttään. Mahdollisten yksiköiden sarja- ja laitenumerot voidaan syöttää niille varattuihin kenttiin.

The screenshot shows a window titled "DUT-info.vi" with a blue background. The main title "DUT-info" is centered at the top. Below it, the section "DUT" contains five input fields: "Laiteryhmä" (Yleismittari), "Valmistaja" (Hewlett-Packard), "Laitetyyppi" (3458A), "Sarjanumero(t)" (6734A1928), and "Laitenumero(t)" (2400-3235). A "Vaihda..." button is to the right of the "Valmistaja" field. Below this is the "Asiakas" section with three fields: "Nimi" (Nemko Product Services Oy), "Osoite" (Perkkäantie 11), and "Puhelin" (042-454541). The "Todistus" section at the bottom has three fields: "Todistuksen numero" (08473), "Kalibroija" (Tapio Rautkari), and "Hyväksyjä" (Tapio Heino). At the very bottom are "OK" and "Peruuta" buttons.

**Kuva 4.3** DUT-info

*Vaihda*-painikkeella avautuu kuvan 4.4 kaltainen ikkuna, jossa on lueteltuna valitut laiteryhmän kaikki laitetypit. Tässä ikkunassa laiteryhmää voidaan vaihtaa *vaihda*-painikkeella, jolloin luetellaan alla olevaan laitetyyppilistaan kyseisen ryhmän laitteet. Jos laitteen ryhmää ei ole tiedossa, voidaan tyyppiä etsiä *etsi*-painikkeella. Haluttu laitetyyppi valitaan käytettäväksi *valitse*-painikkeella tai hiiren kaksoispainalluksella.



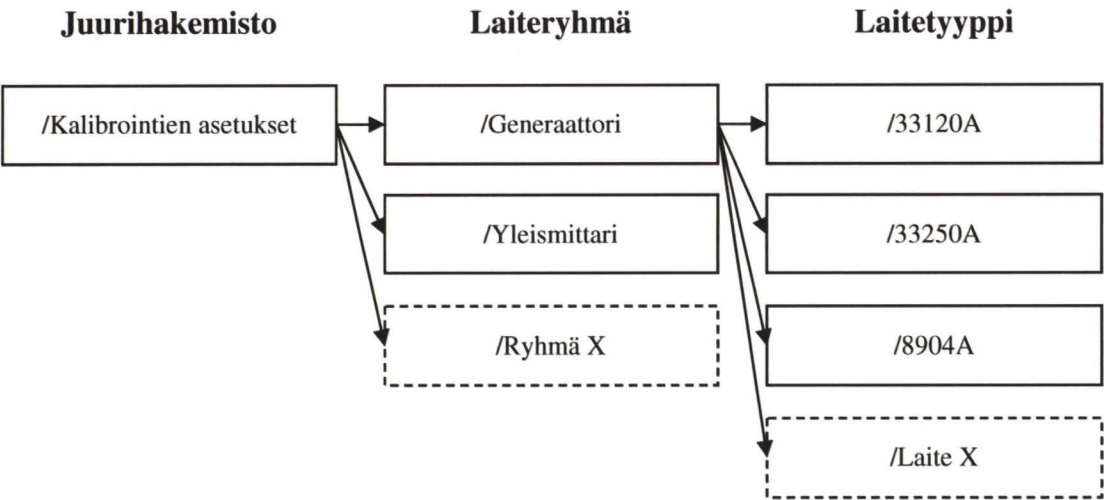


Kuva 4.4 Laitetyypin valinta

Laitetyyppiä voidaan etsiä *etsi*-painikkeella, jolloin avautuu uusi ikkuna. Etsintä tapahtuu käyttäjän kirjoittaman merkkijonon perusteella kaikista laiteryhmistä. Löydetyt laitetypit tulostuvat listaksi, josta haluttu laite voidaan valita *ok*-painikkeella tai hiiren kaksoispainalluksella. Lista päivittyy reaaliaikaisesti käyttäjän kirjoittaman tekstin perusteella. Tällöin tyhjä hakuteksti löytää kaikki laitetypit ja teksti ”34” löytää esimerkiksi laitetypit 1034, 34401A, 3458A ja 3478A.

*Vaihda*-painikkeella avautuu uusi ikkuna, jossa luetellaan kaikki laiteryhmit. Laiteryhmä valitaan hiirenkaksoispainalluksella tai *ok*-painikkeella.

Kalibroitavien laitteiden ryhmät ja tyypit on jaoteltu hakemistoiksi siten, että hakemistopuun juuressa sijaitsevat laiteryhmit ja näiden alla eri laitetypit. Laitetyyppien hakemistoissa sijaitsevat kuhunkin yksittäisiin kalibrointeihin liittyvät tiedot ja asetukset. Kuva 4.5 esittelee käytettyä tietorakennetta.



Kuva 4.5 Laiteryhmien ja -tyyppien hakemistot

4.2.2. Hakemistojen asetukset

Kun kalibrointiohjelma käynnistyy, yrittää se avata tiedoston CP.ini, joka sisältää hakemistojen asetukset. Jos tiedosto löytyy, hakemistojen asetukset tallennetaan ns. globaaleihin muuttujiin, jotka ovat kaikkien aliohjelmien käytössä.

*Hakemistojen asetukset* -ikkunassa voidaan tarkastella ja tarvittaessa muuttaa hakemistojen sijainteja esimerkiksi siirrettäessä ohjelmistoa tai sen osia paikasta toiseen. Jos asetuksiin tehdään muutoksia, ne tallennetaan CP.ini-tiedostoon ja globaaleihin muuttujiin. Taulukossa 4.1 on esitelty ohjelmiston tarvitsemat hakemistot.

Hakemisto	Selitys
Kalibrointien asetukset	Juurihakemisto kalibrointien asetuksille. Hakemisto sisältää laiteryhmiä hakemistot ja niiden alla laitetyyppien hakemistot kuvan 4.5 mukaisesti.  <i>Oletus: CP\Asetukset\Kalibrointien asetukset</i>
Väylän asetukset	Juurihakemisto kunkin laitetyypin ohjausväylän asetuksille. Asetuksien hakemistot voidaan tarvittaessa jakaa alihakemistoihin esimerkiksi laiteryhmän mukaan, kuten kalibrointienkin hakemistojen tapauksessa. Asetukset sisältävät ohjausväylän fyysisien ominaisuuksien lisäksi ohjauksessa tarvittavat komennot sekä niiden muunnon selkokielelle.  <i>Oletus: CP\Asetukset\Väyläasetukset</i>
Word-pohja	Word-dokumentin pohja, joka sisältää yrityksen mallin kalibrointitodistukselle. Käytössä vain yksi yhteinen pohja kaikille laitetypeille, joten yrityksen todistuspuhjan muuttuessa, ei tarvita kuin yhden dokumentin muokkausta.  <i>Oletus: CP\Asetukset\pohja.doc</i>
Tilapäishakemisto	Tilapäishakemistoon tallennetaan yksittäisten kalibrointien tulokset kunkin mittauksen jälkeen. Näitä tuloksia ei normaalissa käytössä muuteta ja niitä säilytetään varmuuskopioina, ISO/IEC 17025 vaatimusten mukaisesti. Hakemisto jakautuu vuosiluvun mukaisesti alihakemistoihin, jolloin tiedostojen hakeminen on helpompaa.  <i>Oletus: CP\Temp</i>
Vanhat versiot	Juurihakemisto vanhojen kalibrointirutiiniversioiden tallentamista varten.  <i>Oletus: CP\Varmuuskopiot</i>

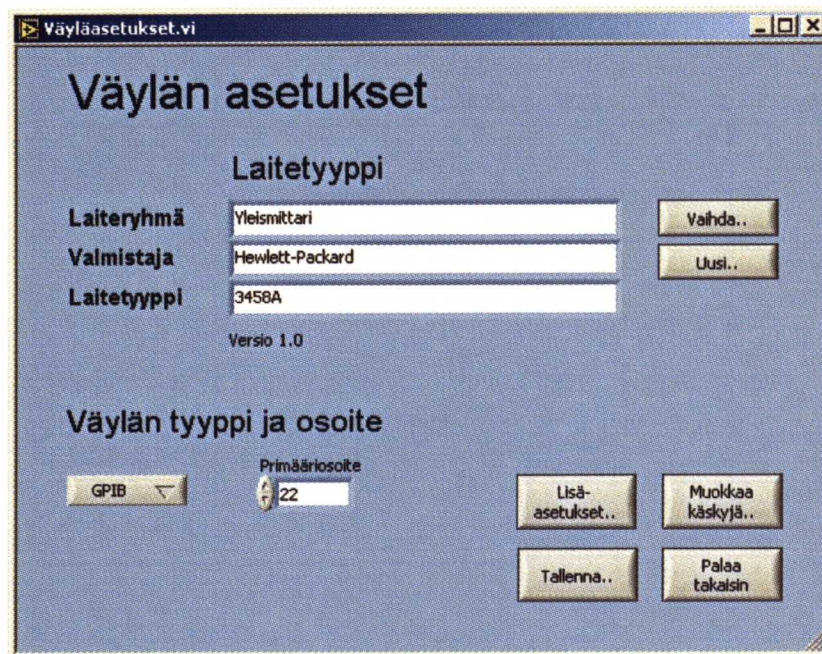
Taulukko 4.1 Ohjelmiston tarvitsemat hakemistot



### 4.2.3. Väylän asetukset

Jokaista mittauslaitetta kohtaan, jota ohjelmassa halutaan käyttää, täytyy luoda väyläasetustiedosto. Tämä tiedosto sisältää kaiken tarvittavan tiedon laitteen ohjausta varten. Tämä tiedosto luodaan ja sitä voidaan muokata kuvan 4.6 esittämässä ikkunassa. Uusi asetustiedosto luodaan painikkeella *uusi*, vanha asetustiedosto voidaan ladata muokattavaksi painikkeella *vaihda* ja asetukset tallennetaan tiedostoon painikkeella *tallenna*. Tiedostomuotona käytetään standardia ini-muotoa, josta esimerkki liitteessä 3.

Väylän asetuksissa määritellään laitteen perustiedot eli laiteryhmä, valmistaja sekä laitetyyppi. Näitä tietoja käytetään käyttäjän apuna muualla ohjelmassa ja niitä käytetään apuna luotaessa kalibrointitodistusta. Yksinkertaisuuden vuoksi ikkunassa määritellään lisäksi vain väylän tyyppi ja sen osoite. Ohjausväylien eri vaihtoehdot ovat GPIB, sarjaväylä, LAN, VXI ja manuaalinen mittaus. Näistä GPIB-, sarja-, ja VXI-väylään on määriteltävissä osoitteen primääriosoite ja VXI-väylään lisäksi sekundääriosoite eli toissijainen osoite. LAN-väylään määritellään numeerinen IP-osoite tai sen nimivastine. Jos mittaus suoritetaan käsin, eli ohjausväylää ei ole, ei osoitetietoa tarvita. Käytössä on siis valinnat primääriosoitteelle, sekundääriosoitteelle ja LAN-osoitteelle, joista kuitenkin näytetään käyttäjälle vain kuhunkin väylään liittyvät osoitekentät.



**Kuva 4.6** Väylän asetukset

Väylän osoitteen lisäksi tarvitaan paljon muutakin tietoa laitteiden ohjaamiseksi. Ohjausväylän fyysiseen toimintaan liittyviä asetuksia voidaan muokata *Lisäasetukset*-painikkeella avautuvan ikkunan avulla. Ohjauksessa käytettäviä komentoja voidaan muokata painikkeella *muokkaa käskyjä*.



Ohjausväylän asetukset on oletukseltaan tehty sellaisiksi, että ne toimisivat suurimmassa osassa mittauslaitteita oikein. Joskus näitä asetuksia joudutaan kuitenkin muuttamaan esimerkiksi luettavien tavujen lukumäärän osalta. Asetuksien muuttaminen tapahtuu kuvan 4.7 esittämän ikkunan avulla. Asetukset on jaoteltu väylätyypin mukaan eri välilehdille, joista valittu välilehti määrää käytettäväksi aiotun väylätyypin. Kaikkien väylätyyppien asetukset tallennetaan asetustiedostoon, jolloin vahingossa valittu väärä väylätyyppi ei kadota muita tietoja.

Tarvittaessa ohjelmistoon voidaan lisätä erilaisia väylätyyppejä lisäämällä uusia välilehtiä väylän lisäasetukset-ikkunaan. LabVIEW:n versio 6.0 sisältää tuen myös PXI-laitteille sekä tietokonepohjaisille DAQ-laitteille, mutta näiden väylätyyppien lisäämistä ohjelmistoon ei nähty tarpeellisenä. Muiden erikoisempien ohjausväylien lisäämiseksi tarvitaan lisäksi ohjelmistopäivityksiä.



**Kuva 4.7** Väylän lisäasetukset

GPIB-väylän välilehti sisältää seuraavat asetukset:

- **Osoite**, määrittelee käytettävän primääriosoitteen
- **Timeout**, määrittelee ajan, jonka jälkeen kirjoitus/luku-operaatio keskeytetään
- **Tavujen lukumäärä**, määrittelee luettavien tavujen lukumäärän
- **Lopetusmerkki (luku)**, määrittelee tiedonsiirron lopetusmerkin
- **Lopetusmerkki (kirjoitus)**, määrittelee tiedonsiirron lopetusmerkin

GIPB-väylän *Lopetusmerkki (luku)* voi saada jonkin seuraavista arvoista:

- **Ei merkkiä** Tiedonsiirto päättyy, kun määritelty tavujen lukumäärä on vastaanotettu
- **CR** Tiedonsiirron päättymisen merkinä on ASCII-merkki CR, signaalilinja EOI tai kun määritelty tavujen lukumäärä on vastaanotettu
- **LF** Tiedonsiirron päättymisen merkinä on ASCII-merkki LF, signaalilinja EOI tai kun määritelty tavujen lukumäärä on vastaanotettu



Vastaavasti GPIB-väylän *Lopetusmerkki (kirjoitus)* voi saada jonkin seuraavista arvoista:

- **EOI** Tiedonsiirto päätetään nostamalla signaalilinja EOI ylös viimeisen merkin lähetyksen yhteydessä
- **EOI+CR** Lähetettävään merkkijonon loppuun lisätään ASCII-merkki CR ja tiedonsiirto päätetään nostamalla signaalilinja EOI ylös samalla, kun lähetetään viimeinen merkki
- **EOI+LF** Lähetettävään merkkijonon loppuun lisätään ASCII-merkki LF ja tiedonsiirto päätetään nostamalla signaalilinja EOI ylös samalla, kun lähetetään viimeinen merkki
- **EOI+CR+LF** Lähetettävään merkkijonon loppuun lisätään ASCII-merkit CR ja LF ja tiedonsiirto päätetään nostamalla signaalilinja EOI ylös samalla, kun lähetetään viimeinen merkki
- **CR** Lähetettävään merkkijonon loppuun lisätään ASCII-merkki CR, mutta signaalilinjaa EOI ei käytetä
- **LF** Lähetettävään merkkijonon loppuun lisätään ASCII-merkki LF, mutta signaalilinjaa EOI ei käytetä
- **CR+LF** Lähetettävään merkkijonon loppuun lisätään ASCII-merkit CR ja LF, mutta signaalilinjaa EOI ei käytetä
- **Ei merkkiä** Signaalilinjaa EOI ei käytetä eikä merkkijonoon lisätä merkkejä

Sarja-väylän välilehti sisältää seuraavat asetukset:

- **Osoite**, määrittelee käytettävän sarjaportin
- **Puskurin koko**, tulo- ja lähtöpuskurien koko tavuina
- **Nopeus**, määrittelee käytettävän tiedonsiirtonopeuden
- **Data-bitit**, tiedonsiirrossa käytettävien bittien määrän tavua kohti
- **Stop-bitit**, määrittelee tiedonsiirron stop-bittien määrän
- **Pariteetti**, määrittelee virheentarkistuksessa käytettävän pariteetin

Erillistä muuttujaa luettavien tavujen määrälle ei sarjaliitännän tapauksessa välttämättä tarvita, sillä lukukomento voidaan toteuttaa siten, että se lukee kaikki väylältä saatavat tavut.

Pariteettitiedon tarkistuksessa on mahdollista valita jokin seuraavista arvoista:

- **Ei** Pariteettitiedon tarkistusta ei suoriteta
- **Pariton** Indikaattori, onko lähetettyjä ykkösbittejä saapunut pariton määrä
- **Parillinen** Indikaattori, onko lähetettyjä ykkösbittejä saapunut parillinen määrä
- **Bitti 1** Pariteettibitti on aina 1
- **Bitti 0** Pariteettibitti on aina 0

LAN-väylän välilehti sisältää seuraavat asetukset:

- **Osoite**, määrittelee käytettävän numeerisen IP-osoitteen tai sen nimivastineen
- **TCP-portti**, määrittelee käytettävän TCP-portin numeron
- **Tavujen lukumäärä**, määrittelee luettavien tavujen lukumäärän

VXI-väylästä voidaan määritellä seuraavat ominaisuudet:

- **Primääriosoitte**, määrittelee käytettävän primääriosoitteen (kehikon osoite)
- **Sekundääriosoitte**, määrittelee käytettävän sekundääriosoitteen (laitteen osoite)
- **Timeout**, määrittelee ajan, jonka jälkeen kirjoitus/luku-operaatio keskeytetään
- **Tavujen lukumäärä**, määrittelee luettavien tavujen lukumäärän
- **Lopetusmerkki (luku)**, määrittelee tiedonsiirron lopetusmerkin
- **Lopetusmerkki (kirjoitus)**, määrittelee tiedonsiirron lopetusmerkin

Ohjelmisto olettaa, että VXI-mittauslaitetta ohjataan VXI-kehikon Slot-0-yksikön GPIB-väylän kautta. Lopetusmerkit ovat tällöin samat kuin GPIB-väylässä.

Väylän fyysisten ominaisuuksien asettelemisen lisäksi ohjelmistolle on määriteltävä käytettävät väyläkäskyt. Mittauslaitteelle komennettavien käskyjen lisäksi määritellään myös näitä komentoja vastaavat selkokiegeliset vastineet, jotka näytetään kalibroijalle. Väylän asetukset -ikkunasta päästään kuvan 4.8 esittelemään väyläkäskyt-ikkunaan painikkeella *muokkaa käskyjä*. Väyläkäskyt-ikkunassa määritellään kaikki tarpeelliset käskyt mittauslaitteelle ja niitä vastaavat selkokiegeliset komennot. Komentojen nimiä käytetään myös kalibrointitodistuksen luomisessa, joten suomenkieliseen todistukseen kannattaa valita suomenkieliset nimet.

**Väyläkäskyt** Hewlett-Packard 33120A

**Laitteen asetukset**

Nimi	Käsky
Taajuus	FREQ
Amplitudi	VOLT
Offset	VOLT:OFFSET
AM taajuus	AM:INT:FREQ
AM syvyys	AM:DEPTH
FM taajuus	FM:INT:FREQ

☒ Pilkun muunto pisteeksi

**Asetukset ilman parametrejä (makrot)**

Nimi	Käsky
Reset	*CLS;*RST
Imp 50	OUTPUT:LOAD 50
Imp high	OUTPUT:LOAD INF
Sini	FUNCTION:SHAPE SIN;
Kantti	FUNCTION:SHAPE SQU;
Kolmio	FUNCTION:SHAPE TRI;

**Tulosten luku**

Nimi	Käsky	Perusyksikkö
Amplitudi	SOUR:VOLT?	V

☒ Pisteen muunto pilkuksi

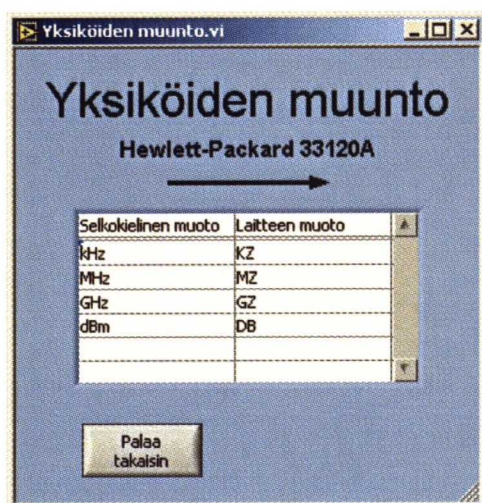
OK Peruuta

Kuva 4.8 Väyläkäskyjen asetukset



Väyläkäskyt jakautuvat kolmeen erityyppisiin käskyihin, jotka ovat *käskyt parametreillä*, *käskyt ilman parametrejä* ja *lukemiseen tarkoitetut käskyt*. Ikkunassa on myös mahdollista määritellä tarvitaanko käskyjen yhteydessä pilkun muunnosta pisteeksi ja tulosten lukemisen yhteydessä pisteen muunnosta pilkuksi. Yleensä tarvitaan lisäksi yksiköiden muuntoa selkokielestä mittauslaitteen tajuamaan muotoon. Näitä muunnoksia päästään muokkaamaan painikkeella yksiköiden muunto.

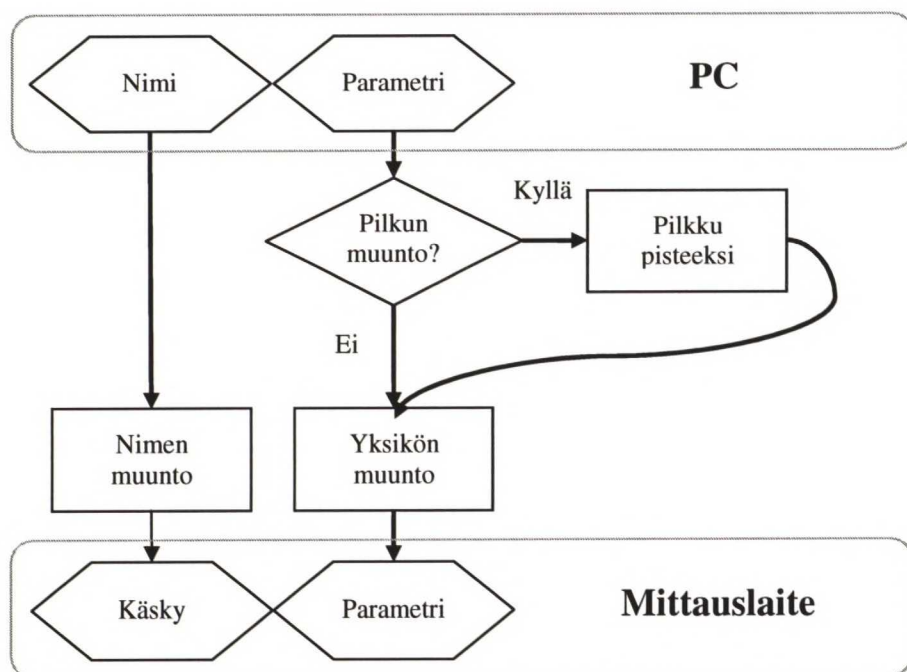
*Laitteen asetukset* –taulukossa määritellään sellaiset käskyt, jotka tarvitsevat jonkin parametrin toimiakseen oikein. Tällaisia käskyjä ovat esimerkiksi taajuus ja amplitudi. Sarakkeeseen *nimi* annetaan käskyn selkokielen nimi ja sarakkeeseen *käsky* laitteen tajuama väyläkäsky. Mittauslaitteet tajuavat yleensä desimaalierottimeksi pisteen, joten selkokielisestä käskystä tarvitsee yleensä muuntaa pilkku pisteeksi. Tähän tarkoitukseen riittää rasti ruutuun *pilkun muunto pisteeksi*. Mittauslaitteet eivät myöskään yleensä tajua SI-yksiköitä sellaisenaan, joten yksiköiden muuntoa päästään muokkaamaan ikkunassa *yksiköiden muunto* (kuva 4.9). Helpotusta tähän muunnokseen tuo SCPI-kieli, jonka avulla SI-yksiköt toimivat sellaisenaan. SCPI-kieli on määritelty vain uusimpiin mittauslaitteisiin, joten muuntoa tarvitaan, sillä jokaisella mittauslaitteella on oma käsityksensä kuinka yksiköitä tulisi käyttää. Esimerkiksi yksikkö MHz voitaisiin esittää seuraavilla tavoilla: MZ, MAHZ tai E+6H, riippuen mittauslaitteesta, sen iästä ja valmistajasta.



**Kuva 4.9** Yksiköiden muunto

*Yksiköiden muunto* –ikkunassa selkokielliset komennot asetetaan taulukon vasemmanpuoleiseen sarakkeeseen ja mittauslaitteen niitä vastaavat komennot oikeanpuoleiseen sarakkeeseen. Selkokiellisessä muodossa kannattaa käyttää SI-järjestelmän yksiköitä, sillä nämä yksiköt tulostuvat myös kalibrointitodistukseen. Oikeanpuoleiseen sarakkeeseen voidaan lisäksi määritellä käskyjä yksikön muunnoksen jälkeen. Tällainen toimenpide saattaa olla tarpeellista, jos halutaan yhdistää samaan toimintoon liittyviä komentoja. Esimerkiksi joillekin laitteille tarvitaan amplitudin asettelun jälkeen komento, joka asettaa amplitudin päälle nollatilasta.

*Laitteen asetukset* -taulukon asetuksia voidaan kokeilla käytännössä taulukon vieressä sijaitsevalla painikkeella *kokeile käskyä*. Tällöin ohjelma kysyy käskylle parametriä, jonka jälkeen käsky suoritetaan mittauslaitteelle samalla menetelmällä kuin oikeassakin kalibroinnissa. Tällä tavalla on helppo kokeilla, toimivatko käskyt halutulla tavalla. Käskyn muuntaminen selkokieelisestä mittauslaitteen ymmärtämään muotoon tapahtuu kuvan 4.10 mukaisesti.



**Kuva 4.10** Normaalin käskyn muuntaminen mittauslaitteelle

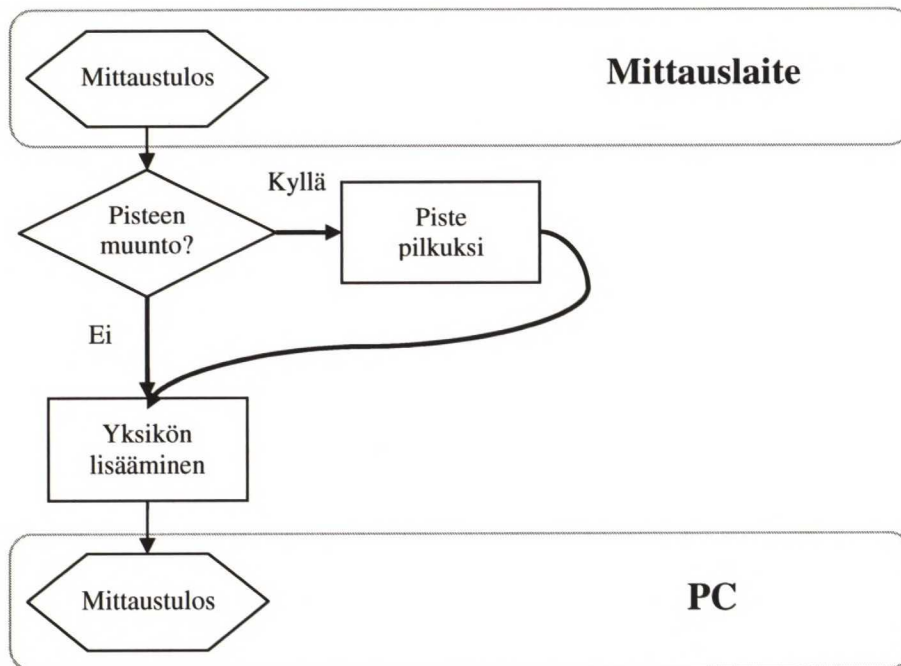
Esimerkiksi selkokieelinen teksti ”Taajuus 10,5 MHz”, voisi muuntua tällöin laitteen ymmärtämään muotoon ”FR 10.5 MZ”. Huomattavaa on, että muunnoksessa välilyönneillä ja isoilla sekä pienillä kirjaimilla on eroa, joten käskyt on kirjoitettava merkilleen oikealla tavalla.

Asetuksia ilman parametrejä kutsutaan ohjelmassa yleisesti makroiksi. Nimitys viittaa pieneen ohjelmapätkään, eli tällaisten asetusten avulla voidaan käskää pitkiäkin komentoja. Tyypillisiä makroja ovat mittaavalle laitteelle annettavat komennot, jotka asettavat laitteen johonkin tiettyyn asetustilaan, jossa on maksimaalinen mittaustarkkuus. Makroja on erityisen kätevää käyttää kalibroinnin alussa asettamaan mittauslaite haluttuun tilaan, jota ei tarvitse mittauksen aikana muuttaa. Kuitenkaan makrot eivät ole rajoittuneita alkuasetuksiin asetteluun, vaan niitä voidaan käyttää koska vain. Näiden komentojen nimet asetetaan kuvan 4.8 toiseen taulukkoon, ensimmäiseen sarakkeeseen. Nimiä vastaavat käskyt asetetaan saman taulukon vastaavan rivin toiseen sarakkeeseen. Käskyille ei suoriteta pilkun tai yksiköiden muuntoa, vaan makrot suoritetaan sellaisenaan. Makroja voidaan kokeilla taulukon vieressä olevalla painikkeella *kokeile käskyä*.

Esimerkkinä lyhyt makron nimi ”DCV” voi viitata melko pitkään käskyyn ”RESET;FUNC DCV;NPLC 200;NDIG 8;AZERO ON;TRIG AUTO;DISP ON;”.



Tuloksien lukemiseen tarvittavat komennot asetetaan kuvan 4.8 viimeiseen taulukoon. Käskyjen nimet ja niitä vastaavat komennot asetetaan aivan kuten muissakin taulukoissa. Mittauslaitteista saatava tulos on paljas luku, joten sille on annettava oikea yksikkö mittaustuloksia varten. Taulukon viimeiseen sarakkeeseen asetetaan mittaustuloksen yksikkö, eli jos mittaustulos on voltteja, yksiköksi tulee V. Vastaavasti, jos mittaustulos on yksiköltään milliwatteja, yksiköksi tulee mW, eli kerrannaisyksiköt tulee ottaa mukaan. Mittauslaitteissa desimaalierottimena toimii yleensä piste, jolloin se on muunnettava pilkuksi. Rasti ruudussa *pisteen muunto pilkuksi*, muuntaa nimensä mukaisesti mittaustuloksen mahdollisen pisteen pilkuksi. Tuloksien lukemista voidaan kokeilla taulukon vieressä sijaitsevalla painikkeella *kokeile käskyä*. Tällöin käsky komennetaan mittauslaitteelle ja mittaustulos annetaan käyttäjälle erillisellä huomioikkunalla. Mittaustuloksen muuntaminen tapahtuu kuvan 4.11 mukaisesti.

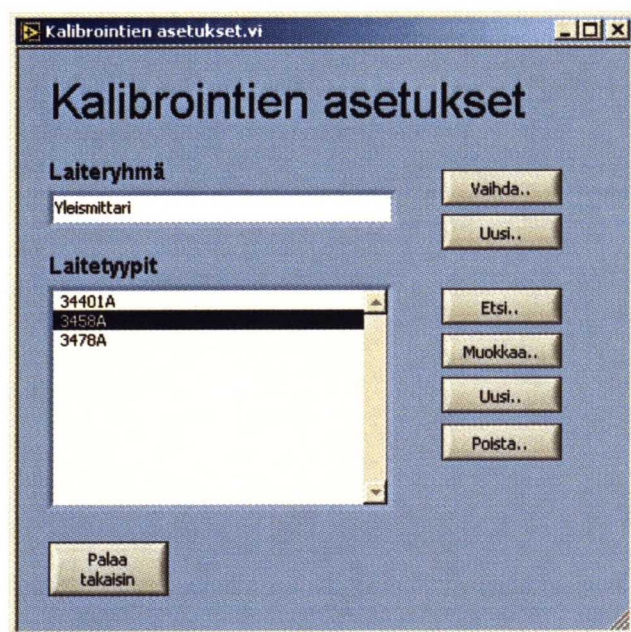


**Kuva 4.11** Mittaustuloksen muuntaminen tietokoneelle

Ohjelmistossa on vain yksi aliohjelma, joka suorittaa kaikki mittauslaitteiden ohjaamiseen liittyvät toimenpiteet. Tällä aliohjelmalla sekä käsketään laitteita, että luetaan mittaustuloksia. Käskyjen kokeilemisen yhteydessä aliohjelma ei kuitenkaan kiinnitä huomioita desimaalien määrään, sillä kyseessä on vain koeluontoinen mittaustapahtuma. Muualla ohjelmistossa desimaalien määrä on kuitenkin mahdollista lukita haluttuun tarkkuuteen tai ohjelmisto voi itse yrittää päätellä järkevän tarkkuuden esimerkiksi mittaasepärvarmuustiedoista.

#### 4.2.4. Kalibrointien asetukset

Kun väylän asetuksissa määriteltiin yksittäisen mittauslaitteen ohjaamiseen liittyvät asetukset, määritellään kalibrointien asetuksissa kokonaiseen kalibrointiin liittyvät toimenpiteet. Kalibrointien asetukset on jaoteltu laiteryhmiin ja niiden sisällä yksittäisiin laitetyppeihin. Laiteryhmiä ja -tyyppejä voidaan lisätä kuvan 4.12 esittämässä ikkunassa.

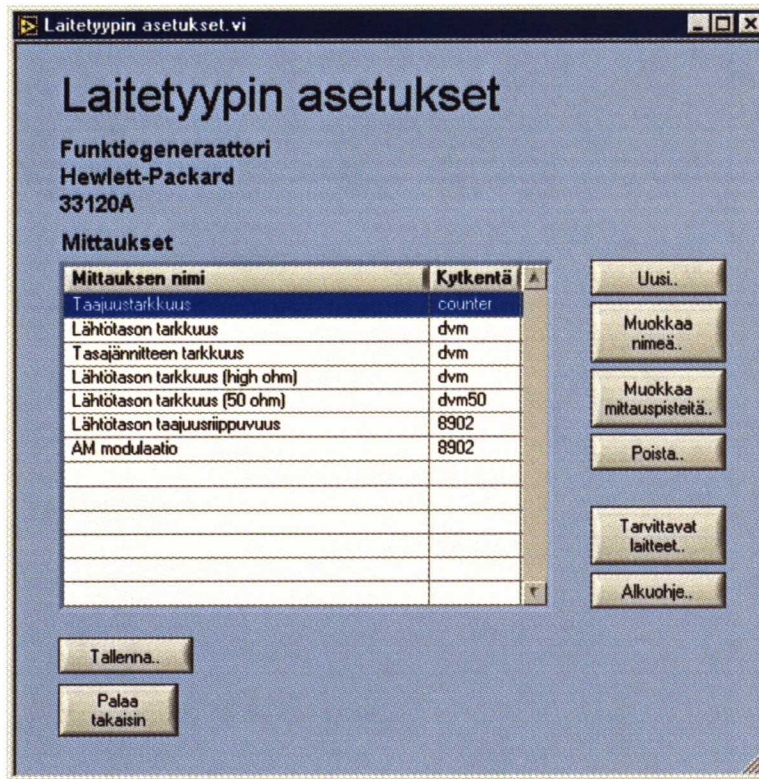


Kuva 4.12 Kalibrointien asetukset

*Kalibrointien asetukset* -ikkunassa näytetään kerralla valitun laiteryhmän laitetypit, joille kalibroinnin suoritus on mahdollista. *Vaihda*-painikkeella voidaan vaihtaa johonkin toiseen laiteryhmään ja sen alapuolella sijaitsevalla *uusi*-painikkeella voidaan luoda uusi laiteryhmä. Laiteryhmien poisto ohjelman avulla ei ole mahdollista, sillä tällöin saatettaisiin vahingossa tuhota tarpeellistenkin laitetyyppien tietoja. Laiteryhmän poisto onnistuu kuitenkin helposti ohjelmiston ulkopuolella tuhoamalla kyseinen hakemisto. Laitetyyppejä voidaan hakea *etsi*-painikkeella, uusia laitetyppejä voidaan luoda *uusi*-painikkeella ja niiden poisto onnistuu *poista*-painikkeella. Laitetyypin poistamisessa kannattaa kuitenkin olla tarkkana, sillä asetukset todellakin tuhoetaan tiedostojärjestelmästä, eikä niitä voida palauttaa kovinkaan helposti.

*Kalibrointien asetukset* -ikkuna on hyvin samankaltainen toiminnaltaan kuin kalibroitavan laitetyyppin valinta *DUT-info*-ikkunassa. Erona on, että tässä tapauksessa ryhmiä ja tyyppieä voidaan lisätä sekä poistaa. Käyttöliittymää on tällä tavoin pyritty yhdenmukaistamaan käytettävyyssääntöjen mukaisesti. Yksittäisen laitetyyppin kalibroinnin asetuksiin päästään *muokkaa*-painikkeella, jolloin avautuu kuvan 4.13 kaltainen ikkuna, *laitetyypin asetukset*.





**Kuva 4.13** Laitetyypin asetukset

Laitetyypin asetuksissa määritellään yksittäisen laityypin kalibrointiin liittyvät erilliset mittaukset. Määriteltyjen mittausten nimet näkyvät taulukon vasemmanpuoleisessa sarakkeessa. Kuhunkin mittaukseen liittyy jonkinlainen mittaussytkentä, joka voidaan merkitä taulukon oikeanpuoleiseen sarakkeeseen. *Kytkeä*-sarakkeen tarkoitus on auttaa kalibroijaa muistamaan missä mittauksissa on samat kytkennät, jolloin tällaiset kalibroinnit voidaan suorittaa peräkkäin keskeytyksettä.

Mittauksia voidaan lisätä painikkeella *uusi*, jolloin ohjelma kysyy uuden mittauksen nimeä ja sen kytkentää. Uusi mittaus kytkentöineen lisätään tällöin mittauslistan loppuun. Vastaavasti mittauksia voidaan poistaa painikkeella *poista*, jolloin mittaukseen liittyvät tiedostot tuhoetaan ja kyseinen mittaus poistetaan mittauslistasta. Mittausten nimiä ja kytkentöjä voidaan muuttaa *muokkaa nimeä* -painikkeella.

Kuhunkin mittauksen alkuun voidaan määritellä alkuohje, joka näytetään kalibroijalle ennen mittauksen alkamista. Näitä ohjeita voidaan muokata painikkeella *alkuohje*, jolloin muokattavaksi avautuu valitun mittauksen ohjeet. Ohje voi olla sanallinen, tekstimuodossa esitettävä ohjeistus, mutta sen lisäksi voidaan haluttaessa näyttää myös ohjekuva. Ohjekuva voi olla esimerkiksi piirretty kuva kytkennöistä tai valokuva mittaustilanteesta.

Kuhunkin mittaukseen osallistuvat mittauslaitteet määritellään painikkeella *tarvittavat laitteet*, jolloin avautuu lista laitteista joita tarvitaan valitun mittauksen suorittamiseen. Näitä laitteita voidaan lisätä ja poistaa vapaasti, mutta huomattava on, että DUT-laite tulee valita listaan joka tapauksessa. Laitteiden lisääminen tapahtuu valitsemalla halutun mittauslaitteen väyläasetustiedosto.



Kunkin mittauksen varsinaisia mittauspisteitä päästään muokkaamaan *laitetyypin asetukset* -ikkunan *muokkaa mittauspisteitä* -painikkeella. Tällöin avautuu kuvan 4.14 kaltainen ikkuna, jossa määritellään yksityiskohtaisesti mittauksen eteneminen. Kalibroitodistus muodostetaan *mittauspisteet*-ikkunan perusteella, joten sen ulkoasuun ja luettavuuteen kannattaa kiinnittää huomiota. Ennen mittauspisteiden muokkaamista mittauksessa tarvittavat laitteet tulee olla valittuna, sillä tätä tietoa tarvitaan ikkunan luomisessa.

**Mittauspisteet**  
Lähtötason taajuusriippuvuus

Alkuasetukset..

Asetus	Asetus	Min	Tulos	Max
33120A	8902A		8902A	
Taajuus	Taajuus		Jännite	
100 kHz	0,1 MHz	2,925 V	0,000 V	3,075 V
500 kHz	0,5 MHz	2,925 V	0,000 V	3,075 V
1 MHz	1 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
3 MHz	3 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
5 MHz	5 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
7 MHz	7 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
9 MHz	9 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
11 MHz	11 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
13 MHz	13 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
15 MHz	15 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V

**Sarakeiden tulostus**

Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kalibroinnissa
Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Tallennuksessa

Makrot.. Kokeile käskyjä..

Lisää sarakke Poista sarakke

Viive ennen tulosten lukemista

1.0 Sek

OK Peruuta

**Kuva 4.14** Kalibroinnin mittauspisteet

Ikkunan koko muuttuu automaattisesti taulukossa olevien sarakkeiden lukumäärän mukaan. Taulukon ylä- ja alapuolella on asetuksia, jotka liittyvät niiden välissä olevaan sarakkeeseen. Näiden asetusten lukumäärä muuttuu myös automaattisesti taulukon sarakkeiden lukumäärän mukaan. Tarvittaessa taulukkoon saadaan lisää sarakkeita painikkeella *lisää sarakke* ja niitä voidaan poistaa vastaavasti painikkeella *poista sarakke*. Sarakkeiden lukumäärän muutos kohdistuu aina taulukon viimeiseen sarakkeeseen ja muutoksesta johtuen ikkunan kokoa ja asetusten lukumäärää muutetaan sopivasti.

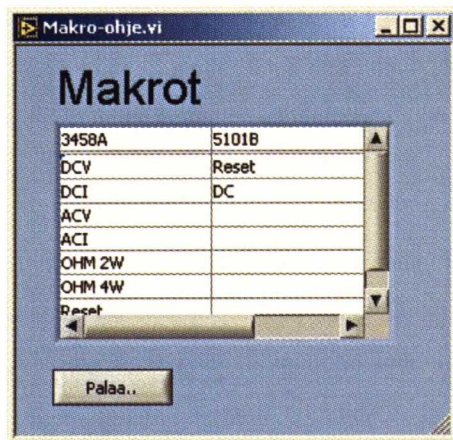


Kalibroinnin varsinaiset mittauspisteet määritellään ikkunan taulukkoon siten, että sarakkeen yläpuolella olevat valintalistat määräävät mitä asetuksia kuhunkin sarakkeeseen tulisi asettaa. Valintalistojen asettelu aloitetaan ylimmästä listasta, jolloin alemmat listat muuntuvat oikeanlaisiksi automaattisesti. Ylin valintalista määrää sarakkeen tarkoituksen, keskimmäinen lista mahdollisen mittauslaitteen ja alin lista mahdollisen mittauslaitteen asetuksen. Kalibrointia suorittaessa sarakkeen valintalistat määräävät mitä tehdään ja taulukon solu tämän tapahtuman parametrit. Jos taulukon solu on tyhjä, sitä ei suoriteta, lukuun ottamatta mittautuloksen tapausta, joka suoritetaan aina. Taulukko 4.2 listaa ylimmän valintalistan mahdolliset arvot.

Nimi	Selitys
Asetus	Asetus mittauslaitteelle  2. valintalista: luettelo laitteista 3. valintalista: valitun laitteen normaalit käskyt
Tulos	Mittaustuloksen luku mittauslaitteesta  2. valintalista: luettelo laitteista 3. valintalista: valitun laitteen tuloksien lukuun liittyvät käskyt
Ohje	Ohje kalibroijalle, käytetään mm. jos kytkentää vaihdetaan kesken mittausta  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
Kommentti	Yleinen kommentti, vapaa kenttä todistusta / kalibroijaa varten  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
Viive	Kalibroinnissa pysähdytään viiveen määrittelemäksi ajaksi  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
Matematiikka	Sarakkeen soluihin on määriteltynä matemaattisia operaatioita  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
Min	Laitevalmistajan spesifikaatioihin perustuva mittautuloksen minimiarvo  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
Max	Laitevalmistajan spesifikaatioihin perustuva mittautuloksen maksimiarvo  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
±Vaatimus	Laitevalmistajan spesifikaatioihin perustuva mittautuloksen maksimipoikkema  2. ja 3. valintalista: tyhjiä
Epävarmuus	Mittaustuloksen mittausepävarmuus  2. ja 3. valintalista: tyhjiä

**Taulukko 4.2** Mittauspisteet -ikkunan ylimmän valintalistan mahdolliset arvot

Jos ensimmäisen valintalistan arvoksi on valittu asetus, viimeiseen valintalistaan listataan keskimmäisestä valintalistasta valitun mittauslaitteen kaikki normaalit käskyt, jotka saadaan väyläasetustiedostosta. Tämän lisäksi viimeiseen valintalistaan lisätään aina käskyt *makro* ja *suora käsky*. Makro viittaa parametrattomiin käskyihin, jotka määriteltiin väyläasetustiedostoon. Laitetyypistä riippuen makroja saattaa olla määriteltynä monia erilaisia, eikä käyttäjän oletetakaan muistavan niitä kaikkia. Painikkeella *makrot* saadaan esiin kuvan 4.15 kaltainen ikkuna, jossa on lueteltuna mittaukseen valittujen mittauslaitteiden mahdolliset makrot. Ikkunan koko muuttuu automaattisesti sellaiseksi, että kaikki mittauslaitteet näkyvät yhtä aikaa näytöllä. Valittaessa arvo *makro* alimpaan valintalistaan, voidaan sen sarakkeen soluihin kirjoittaa jokin kyseisen laitteen makroista. Valittaessa arvo *suora käsky* alimpaan valintalistaan, voidaan kyseistä mittauslaitetta komentaa suoraan sen omilla väyläkäskyillä. Tällöin sarakkeen soluihin voi kirjoittaa sellaisia käskyjä, jotka välittyvät mittauslaitteelle sellaisenaan, esimerkiksi \*RST.



**Kuva 4.15** Luettelo käytettävistä makroista

Tapauksessa, jolloin ylimpään valintalistaan on valittu asetus, voidaan sarakkeen soluissa käyttää asetusarvojen yksikköinä väyläasetustiedostossa määritellyjä yksikköjä. Lisäksi voidaan tietenkin käyttää sellaisia yksiköitä, joita laite tunnistaa sellaisenaan.

Jos ylimpään valintalistaan on valittu asetus tulos, ei sarakkeen soluihin tarvitse kirjoittaa välttämättä mitään. Kuitenkin jos mittaustuloksen desimaalien määrä tai kerrannaisyksikkö halutaan lukita johonkin tiettyyn arvoon, on nämä tiedot määriteltävä tämän sarakkeen soluihin. Desimaalien määrä lukitaan kirjoittamalla muotoilultaan mittaustulosta vastaava luku haluttuun soluun. Yksikkö ja kerrannaisyksikkö lukitaan kirjoittamalla tämä yksikkö mahdollisen muotoilun perään välimerkillä erotettuna. Näillä säännöillä muotoilu 0,000 mW voisi tuottaa mittaustuloksen 0,999 mW. Pilkkua edeltävien numeroiden määrää ei huomioida, joten samalla muotoilulla olisi mahdollista saada myös mittaustulos 100,141 mW. Jos muotoilua ei määritellä, desimaalien määrä pyritään saamaan ensisijaisesti mittaasepävarmuussarakkeesta, jos sellainen on määriteltynä. Toissijaisesti desimaalien määrä voidaan saada myös minimi- tai maksimisarakkeesta. Näissä tapauksissa näiden solujen muotoilu määrää desimaalien määrän sekä yksikön. Viimeisenä vaihtoehtona käytetään yksikkönä väyläasetustiedoston määrittelemää perusyksikköä ja desimaalien määränä kiinteää kuutta kappaletta.



Joskus on tarpeellista laskea mittaustuloksen poikkeama referenssiarvosta, tai esimerkiksi laskea taajuusvaste desibeleinä mitattujen taajuuspisteiden amplitudeista. Tähän tarkoitukseen ohjelmistolla on mahdollista suorittaa matemaattisia toimenpiteitä valitsemalla *mittauspisteet* -ikkunan ylimmän valintalistan arvoksi *matematiikka*. Tällöin sarakkeen soluihin voidaan kirjoittaa kaavoja, jotka lasketaan auki kalibroinnin yhteydessä. Kaavojen käyttö on hyvin saman tapaista kuin Microsoftin valmistamassa taulukkolaskentaohjelmassa Excel. Tässä ohjelmassa taulukon soluihin voidaan viitata tyyliin A1 tai R1C1, joista jälkimmäinen muoto on valittu kalibrointiohjelmistoon. Tässä muodossa kirjaimen R jälkeinen numero määrittelee rivin ja kirjaimen C jälkeinen numero sarakkeen. Kaavat aloitetaan aina Excelin mukaan yhtäsuuruusmerkillä. Mahdolliset matemaattiset toimenpiteet on lueteltu liitteessä 2.

Jotta matematiikka olisi mahdollista, on toimenpiteissä käytettävien solujen tekstimuotoiset arvot muutettava numeerisiin muotoihin. Muunnoksessa jaetaan tekstimuotoinen luku sen numeeriseen osaan ja yksikköön. Tämän jälkeen yksiköstä tarkistetaan onko sen ensimmäinen merkki jokin SI-järjestelmän mukainen etuliite. Jos näin oli, kerrotaan luvun numeerinen osa etuliitettä vastaavalla numeerisella kertoimella. Etuliitteet ja niitä vastaavat kertoimet on lueteltu SFS:n julkaisemassa SI-oppaassa [33]. Ohjelmistoon on määriteltä vain sellaiset etuliitteet joita vastaavan kertoimen eksponentti on kolmella jaollinen. Tämän johdosta etuliitteitä hehto, deka, desi ja sentti ei ole määriteltä. Lisäksi mikron merkki "μ" on määriteltä pienellä u-kirjaimella, sillä sen syöttö normaalilta näppäimistöltä on vähintäänkin hankalaa.

Matematiikkaa käytetään yleensä tulosten laskemiseen, joten niille voidaan määritellä muotoilu aivan samalla tavalla kuin normaaleille mittaustuloksille. Erona on, että muotoilu kirjoitetaan kaavan jälkeen puolipisteellä erotettuna. Matematiikalla saatava lopputulos saattaa yksiköltään olla mielivaltainen, joten sopivaa yksikköä ei edes yritetä hakea epävarmuussarakkeesta. Jos muotoilua ei määritellä, seurauksena on luku kuudella desimaalilla ilman yksikköä. Taulukossa 4.3 on muutamia esimerkkejä matematiikan käytöstä.

Kaava	Selitys
=R1C2-R1C1;0,0000 Hz	Vähentää solun R1C1 arvon solusta R1C2 Tuloksen muoto: 0,0000 Hz
=(R2C3/R1C3)*100;0,0 %	Solun R2C3 suhde soluun R1C3 kerrottuna luvulla sata Tuloksen muoto: 0,0 %
=((R8C4/R1C4)-1)*100;0,00 %	Solun R8C4 suhde soluun R1C4 miinus yksi, kerrottuna sadalla Tuloksen muoto: 0,00 %
=10*log(R2C2/R1C2);0,00 dB	Logaritmi solujen R2C2 ja R1C2 suhteesta kerrottuna luvulla 10 Tuloksen muoto: 0,00 dB
=10^(R1C3/20)*0,223607; 0,00 mV	Kymmenen korotettuna potenssiin (solun R1C3 arvo jaettuna luvulla 20) kerrottuna luvulla 0,223607 Tuloksen muoto: 0,00 mV

Taulukko 4.3 Esimerkkejä matemaattisista kaavoista

Ennen mittausta laitteiden asetukset kannattaa palauttaa tehdasasetuksiin, jotteivät edellisen mittauksen asetukset jää vahingossa voimaan. Yleensä mittauksissa on lisäksi joitakin suureita, jotka eivät muutu, mutta ne on kuitenkin asetettava mittauslaitteisiin ennen kalibrointia. Esimerkiksi taajuusvastetta mitattaessa vain taajuus muuttuu, ei amplitudi. Ohjelmistossa on mahdollista määritellä juuri näihin tarkoituksiin alkuasetukset kaikille mittauksessa käytettäville laitteille. Alkuasetuksiin päästään *mittauspisteet*-ikkunan *alkuasetukset*-painikkeella. Tällöin avautuu kuvan 4.16 kaltainen ikkuna, jossa näitä asetuksia voidaan muokata.



**Kuva 4.16** Alkuasetukset

Alkuasetuksissa valintalista *laitetyyppi* määrää, minkä mittaukseen valitun laitteen asetuksia ollaan muuttamassa. Tämän valintalistan oikealla puolella oleviin valintalistoihin ladataan valitun mittauslaitteen mahdolliset asetukset. Asetuksiin lisätään valinnat *makro* ja *suora käsky*, aivan kuten *mittauspisteet*-ikkunassa asetusten kohdalla. Valintalistojen alapuolelle määritellään asetuksen parametri tai makron nimi. Mittausten laitteiden makrot voidaan tarkistaa *makrot*-painikkeella, jolloin avautuu kuvan 4.15 kaltainen ikkunan, eli samanlainen kuin *mittauspisteet*-ikkunassa. Asetuksia voidaan lisätä *lisää käsky* -painikkeella ja niitä voidaan poistaa *poista käsky* -painikkeella. Ikkunan koko muuttuu tarvittaessa siten, että kaikki alkuasetukset näkyvät kerralla näytössä.

*Mittauspisteet*-ikkuna sisältää lisäksi painokytkimillä toteutetut luettelot *kalibroinnissa* ja *tallennuksessa*. Näillä kytkimillä määritellään näytetäänkö kukin sarake kalibroinnin ja tulosten tallennuksen yhteydessä. Asiakkaalle lähtevässä kalibroitodistuksessa ei ole järkevää esittää kaikkea mahdollista kalibrointiin liittyvää informaatiota, jolloin epäoleelliset sarakkeet voidaan jättää todistuksesta pois. Usein esimerkiksi sama taajuus asetetaan sekä lähteeseen ja mittariin, joten todistukseen riittää vain tieto toisesta näistä.

*Mittauspisteet*-ikkunan parametri *viive ennen tulosten lukemista* aiheuttaa kalibroinnissa tämän muuttujan määrittelemän viiveen taulukon jokaisella rivillä aina ennen mittaustuloksen lukemista. Viive riippuu täysin käytetyistä mittauslaitteista ja se voi olla hyvinkin useita sekunteja, jotta laitteet ehtivät asettua lopullisiin arvoihinsa. Yksittäisten mittauspisteiden kohdalla voidaan lisäksi asettaa lisäviivettä, valitsemalla halutun sarakkeen valintalistan arvoksi *viive*.



Kalibrointiohjelmisto antaa mahdollisuuden kokeilla muokattavaa kalibrointirutiinia ennen sen tallentamista. Painikkeella *kokeile käskyjä* voidaan kokeilla miten kalibrointi toimisi käytännössä. Painikkeen valitseminen käynnistää kalibroinnin, joka suoritetaan *mittauspisteet*-ikkunan taulukosta aktiiviseksi valitulta alueelta. Kalibrointia voidaan siis kokeilla vain halutulta alueelta.

Kun laitetyypin asetukset kaikkiin mittauksiin on määritelty, voidaan kalibroinnin asetukset tallentaa. Tallentaminen tapahtuu *laitetyypin asetukset* -ikkunan *tallenna*-painikkeella, joka tallentaa samalla kertaa kaikkien mittauksen kaikki asetukset. Tallentaminen tapahtuu kuvan 4.5 mukaiseen hakemistoon, jolloin syntyvät tiedostot pysyvät yhdessä hakemistossa erossa muiden laitetyyppien asetuksista. Tallennuksessa syntyvät tiedostot:

- laitetyyppi.ini
- mittaus1.ini, mittaus2.ini...
- mittaus1-pisteet.txt, mittaus2-pisteet.txt...

Laitetyyppi.ini sisältää tiedon mittauksen nimistä, niiden kytkentöjen lyhenteistä ja niiden keskinäisestä järjestyksestä. Tiedoston nimi määräytyy kalibroittavan mittauslaitteen tyypin nimen mukaan, esimerkiksi 33120A.ini.

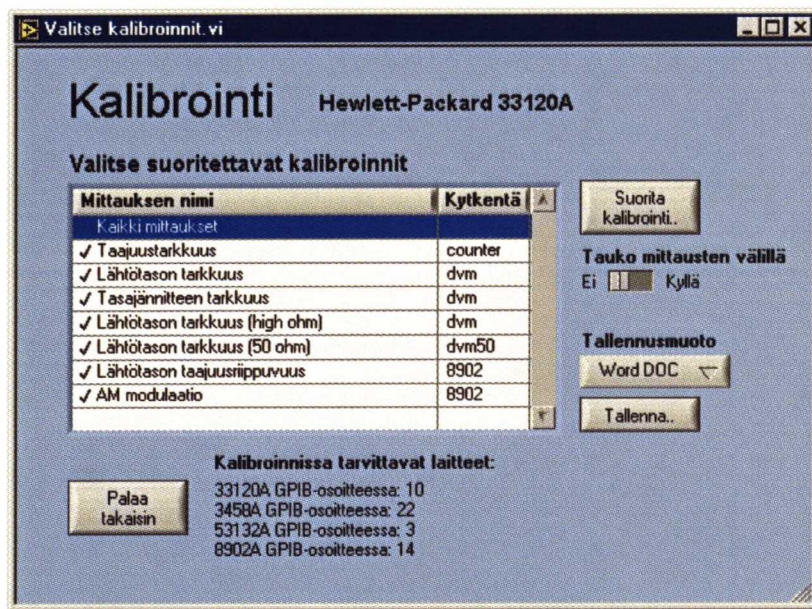
Mittaus1.ini sisältää kaikki kalibroinnissa tarvittavat tiedot, lukuun ottamatta varsinaisia mittauspisteitä. Tähän tiedostoon tallennetaan tiedot ohjeista, mittauksessa tarvittavat mittauslaitteet, viiveen määrä, valintalistojen arvot sekä alkuasetukset. Tiedoston nimi määräytyy mittauksen nimen perusteella, esimerkiksi taajuustarkkuus.ini

Mittaus1-pisteet.txt sisältää asetukset mittauksessa käytettävistä mittauspisteistä eli mittausaulukon. Tiedosto on puhdas tekstitiedosto, joten sen muokkaus onnistuu tarvittaessa millä tahansa tekstinkäsittelyohjelmalla. Varsinkin tehtäessä pitkiä mittausrutiineita muokkaus onnistuu kätevästi Excel-tilukkolaskentaohjelmalla. Ohjelmisto ei kuitenkaan vaadi mitään ulkopuolisia ohjelmistoja, joten mittauspisteiden muokkaus onnistuu hyvin myös *mittauspisteet*-ikkunan avulla. Pistetaulukon tiedoston nimi määräytyy myös mittauksen nimen perusteella, esimerkiksi taajuustarkkuus-pisteet.txt.

Ini-päätteiset tiedostot noudattavat standardia asetustiedosto-muotoa, joka on käytössä lähes kaikissa Microsoft Windows -käyttöjärjestelmälle tarkoitetuissa ohjelmistoissa. Liitteessä 4 on esimerkki asetustiedostoista laitetyyppi.ini, mittaus1.ini ja mittaus1-pisteet.txt.

#### 4.2.5. Kalibrointi

Varsinainen kalibrointi voidaan suorittaa, kunhan kalibroitava laite on ensin valittu *DUT-info*-ikkunan avulla. Kun kalibrointien asetukset on kerran asetettu, käyttäjän ei tarvitse käytännössä liikkua kuin *DUT-info*- ja *kalibrointi*-ikkunan välillä. *Kalibrointi*-ikkuna on ulkonäöltään kuvan 4.17 kaltainen.



Kuva 4.17 Kalibrointi-ikkuna

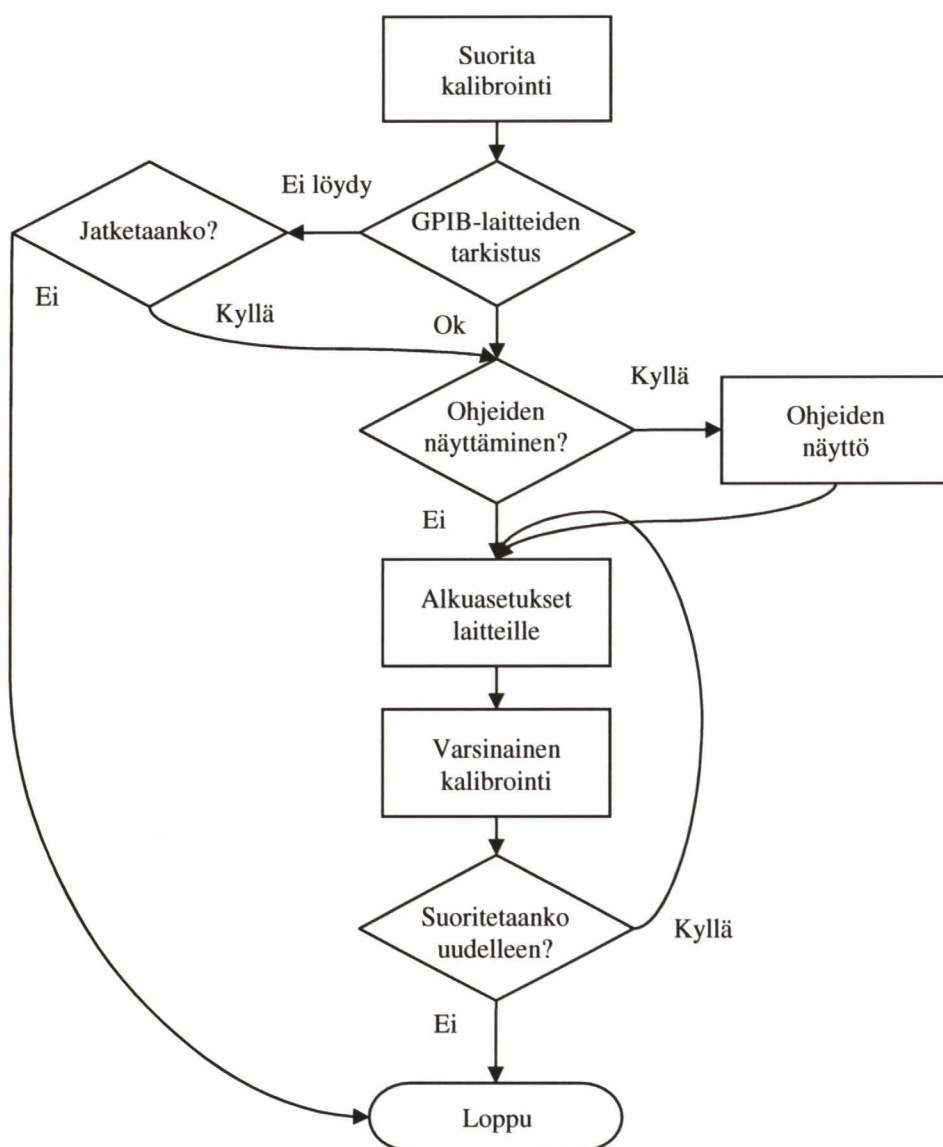
*Kalibrointi*-ikkuna sisältää luettelon laitetyypille määritellyistä mittauksista ja näiden kytkentöjen lyhenteistä. Listan ylimmäiseksi lisätään aina mittaus nimeltä *kaikki mittaukset*, jonka avulla voidaan suorittaa kaikki alla olevat mittaukset yhdellä valinnalla. Mittauksia voidaan valita suoritettavaksi yksi tai useampi kerrallaan, jolloin on mahdollista suorittaa mittaukset, joissa on sama kytkentä, peräkkäin ilman taukoa. Kun mittaus on päättynyt, listan vasempaan reunaan lisätään merkki ✓, jos kalibrointi täyttää mahdolliset min- ja max-vaatimukset tai ±vaatimukset. Merkki lisätään lisäksi, jos vaatimuksia ei ole määritetty. Merkki ✕ lisätään, jos kalibrointi ei täytä vaatimuksia tai jos kalibrointi keskeytetään.

Valitsin *tauko mittausten välillä* määrää, jäädäänkö mittausten jälkeen odottamaan käyttäjän reagointia mittaustulokseen. Jos valitsin on asennossa *ei*, mittaukset suoritetaan peräkkäin, ilman taukoa siten, että mittauksen alussa annettava ohje näytetään vain, jos peräkkäisissä mittauksissa on eri kytkentä. Kuvan 4.17 tapauksessa mittaukset *lähtötason tarkkuus*, *tasajännitteen tarkkuus* ja *lähtötason tarkkuus (high ohm)* voitaisiin suorittaa peräkkäin keskeytyksettä. Jos valitsin asetetaan asentoon *kyllä*, voidaan mittauksen jälkeen tarkastella tuloksia ja mahdollisesti suorittaa sama mittaus uudelleen. Mittaus saatetaan joutua tekemään uudelleen, jos esimerkiksi kytkentä tehtiin väärin.



*Kalibrointi*-ikkuna sisältää listan laitteista, joita tarvitaan valitun mittauksen suorittamiseksi. Tämä lista muuttuu dynaamisesti valitun mittauksen mukaan ja valittaessa useampia mittauksia tai kaikki mittaukset näytetään kaikki mittauslaitteet, joita tarvitaan valituissa mittauksissa. Listan mukana näytetään laitteiden väyläosoitteet.

Mittaukset käynnistetään painikkeesta *suorita kalibrointi*, jolloin ensimmäiseksi tarkistetaan löytyvätkö mittauslaitteet väylältä. Tarkistus suoritetaan vain GPIB-väylälle, jolloin myös mahdolliset VXI-laitteet tarkistetaan, sillä VXI-laitteiden tiedonsiirto tapahtuu ohjelmistossa GPIB-väylän kautta. Laitteet etsitään VISA:n *Find Resource* -toiminnon avulla, jossa hakukriteerinä käytetään merkkijonoa "GPIB?\*INSTR". Jos GPIB-väylän laitteita ei löydetä väylältä, huomautetaan asiasta käyttäjälle. Tilanteesta riippuen näytetään seuraavaksi ohjeteksti ja siihen liittyvä mahdollinen kuva. Tämän jälkeen asetetaan laitteille alkuasetukset ja aloitetaan varsinainen kalibrointi. Kuvassa 4.18 on esitetty yhden kalibrointimittauksen kulku.



**Kuva 4.18** Yhden kalibrointimittauksen kulku

Varsinaisessa kalibroinnissa käydään mittaustaulukkoa läpi solu solulta, aloittaen taulukon vasemmasta yläkulmasta edeten vasemmalta oikealle, ylhäältä alas. Kunkin solun kohdalla tarkistetaan sarakkeen otsikko, jonka perusteella päätetään mitä solun sisällölle tehdään. Kuvassa 4.19 suoritetaan kalibrointia, joka on edellisessä ikkunassa valittu suoritettavaksi ilman taukoa. Tämän johdosta ikkunassa näkyy ainoastaan punainen *keskeytä*-painike, jolla kalibrointi voidaan keskeyttää milloin tahansa. Jos mittauksien väliin valitaan tauko, näkyvät ikkunassa myös *jatka*- ja *suorita uudelleen* -painikkeet. Mittauksen päätyttyä *jatka*-painikkeella jatketaan seuraavaan mittaukseen ja *suorita uudelleen* -painikkeella suoritetaan sama mittaus uudestaan.



**Kuva 4.19** Kalibroinnin suorittaminen

Mittauksen edetessä tutkitaan solujen sisältöjä siten, että jos solu on tyhjä ja sarake ei ole *tulos*-sarake, soluun ei reagoida mitenkään. Lisäksi *kommentti*-, *min*-, *max*-, *±vaatimus* ja *epävarmuus*-sarakkeiden soluihin ei reagoida. *Asetus*-sarakkeen solut sisältävät asetuksia mittauslaitteille, jotka lähetetään niihin tällaiseen soluun siirryttäessä. Jos asetukseksi on valittu *suora käsky*, lähetetään solun sisältö sellaisenaan mittauslaitteelle ja *makron* tapauksessa suoritetaan solun määrittelemä makro. Muussa tapauksessa suoritetaan asetus parametrinaan solun sisältö. Jos sarakkeen otsikkona on *ohje*, antaa ohjelma käyttäjälle viestinä solun sisällön erillisessä ikkunassa ja odottaa *ok*-painikkeen painallusta. *Viive*-sarakkeen soluissa odotetaan solun ilmoittama aika. Aika voidaan ilmaista sekunteina tai sekunnin SI-kerrannaisyksikkönä.



Jos sarakkeen otsikkona on *tulos*, suoritetaan otsikon määrittelemä tuloksen lukukomento. Jos solussa on muotoilu määriteltynä, muodostetaan saadusta mittaustuloksesta muotoiltu versio. Muotoilussa määritellään käytettävä yksikkö ja desimaalien määrä. Jos muotoilua ei ole määritelty, yrittää ohjelmisto etsiä taulukon kyseiseltä riviltä epävarmuus-, *min*-, *max*- tai  $\pm$ *vaatimus*-sarakkeita, joiden mukaan muotoilu tällöin määritellään. Tapauksessa, jossa näitä sarakkeita ei löydy, valitaan yksiköksi väyläasetustiedoston määrittelemä perusyksikkö ja desimaalien määräksi kuusi kappaletta. Lopuksi mittaustuloksesta tarkistetaan sen vaatimustenmukaisuus vertaamalla mittaustulosta saman rivin mahdollisiin *min*-, *max*- ja  $\pm$ *vaatimus*-sarakkeiden soluihin. Jos mittaus ei täytä näitä vaatimuksia, lisätään tuloksen perään tähti ja mittauksen loputtua asiasta huomautetaan käyttäjälle. Tällöin myös kalibrointitodistukseen lisätään huomautus asiasta.

*Matematiikka*-sarakkeen soluihin siirryttäessä suorittaa ohjelmisto solun funktion, jonka jälkeen tulos muotoillaan mahdollisten muotoiluparametrien avulla. Vastaavasti kuin *tulos*-sarakkeen solujen kohdalla, tarkistetaan myös *matematiikka*-sarakkeen solujen kohdalla niiden vaatimustenmukaisuus. Ohjelmisto siis olettaa, että vaatimusten tarkastelu suoritetaan ensisijaisesti *matematiikka*-soluille.

Mittauksen päätyttyä tulokset tallennetaan tilapäistiedostoon, joista voidaan koota lopullinen kalibrointitodistus tai mittauspöytäkirja. Tallentaminen tapahtuu *kalibrointi*-ikkunan valintalistan tallennusmuodon mukaiseen tiedostomuotoon painikkeella *tallenna*. Tällöin tallennetaan suoritettujen mittauksen tulokset teksti-, doc- tai xls-muodossa valittuun tiedostoon.

Tallennettaessa tulokset xls- tai doc-muotoon, suoritetaan tuloksien siirto Microsoftin kehittämän ActiveX-tekniikan avulla. Wordin doc-muodossa saadaan kalibrointitodistus täytettyä melkein kokonaan automaattisesti. Asetuksissa määriteltynä dokumenttipohjaan on määritelty ns. kirjanmerkkejä, joihin tiedot siirretään kalibrointiohjelmistosta. Esimerkki ohjelmiston avulla tehdystä kalibrointitodistuksesta löytyy liitteestä 5.

### 4.3. Esimerkki kalibrointiohjelmasta: HP 33120A

Hewlett-Packardin funktiogeneraattori 33120A on melko yleinen signaaligeneraattori, sillä sen ominaisuudet ovat todella laajat sen hintaan nähden. Generaattori pystyy tuottamaan taajuuksia välillä DC – 15 MHz. Sen avulla voidaan tuottaa sini-, kolmio-, ramppi-, ja kanttiaaltomuodot. Lisäksi laitteen avulla voidaan generoida kohinaa sekä vapaamuotoisia aaltomuotoja. Generaattori sisältää myös sisäiset amplitudi-, taajuus-, ja purskemodulaatiolähteet.

Kalibrointiin valittiin seitsemän erillistä mittausta, joiden suorittamista myös valmistaja suosittelee kalibroinnissa. Mittauspisteiden valinnassa käytettiin suurimmaksi osaksi valmistajan suosituksia. Valitut mittaukset luetellaan taulukossa 4.4.

Mittaus	Selitys
Taajuustarkkuus	Taajuuden tarkkuus eri aaltomuodoilla ja modulaatiolla <i>Ref. mittauslaite: taajuuslaskija HP 53132A</i>
Lähtötason tarkkuus	Lähtötason tarkkuus eri aaltomuodoilla, taajuuksilla ja jännitteillä <i>Ref. mittauslaite: yleismittari HP 3458A</i>
Tasajännitteen tarkkuus	Tasajännitteen tarkkuus ilman vaihtojännitekomponenttia <i>Ref. mittauslaite: yleismittari HP 3458A</i>
Lähtötason tarkkuus (high ohm)	Lähtötason tarkkuus suurohmisena jännitteen eri arvoilla <i>Ref. mittauslaite: yleismittari HP 3458A</i>
Lähtötason tarkkuus (50 ohm)	Lähtötason tarkkuus 50 ohmisena jännitteen eri arvoilla <i>Ref. mittauslaite: yleismittari HP 3458A</i>
Lähtötason taajuusriippuvuus	Lähtötason tarkkuus taajuuden eri arvoilla (taajuusvaste) <i>Ref. mittauslaitteet: mittausvastaanotin HP 8902A mittapää HP 11722A</i>
AM modulaatio	Amplitudimodulaation syvyys eri asetuksilla, kiinteällä taajuudella <i>Ref. mittauslaitteet: mittausvastaanotin HP 8902A mittapää HP 11722A</i>

**Taulukko 4.4** Kalibrointiin valitut mittaukset

Ohjelman tekemiseen kului aikaa yhteensä kaksi tuntia, josta puolet meni väyläasetustiedoston tekemiseen ja testaamiseen. Tässä ajassa ei ole mukana mittauksissa tarvittujen muiden laitteiden väyläasetustiedostojen tekemiseen kulunutta aikaa, sillä ne oli tehty aikaisemmin. Toinen tunti kului varsinaisten mittausten asetusten tekemiseen, mutta tästäkin ajasta noin puolet kului valmistajan asettamien vaatimusten laskemiseen. Normaalisti tämän kaltaisen ohjelmiston



tekemiseen menee aikaa useita päiviä. Kalibrointiohjelmisto nopeuttaa huomattavasti kehitykseen kuluvaan aikaan, joten tehdystä ohjelmistosta saadaan hyöty irti todella nopeasti.

Valmiin kalibroinnin suorittamiseen kului yhteensä seitsemän minuuttia. Tässä ajassa ei ole mukana laitteiden lämpenemiseen kuluvaan aikaan, eikä muihin alkuvalmisteluihin kuluvaan aikaan. Kalibroinnin jälkeen tulokset tallennettiin Wordin dokumentiksi, jota jouduttiin hieman muokkaamaan. Kalibroitodistuksen muotoiluun kului aikaa yhteensä noin neljä minuuttia. Lopputuloksena voidaan sanoa, että kalibrointiin kului aikaa yhteensä noin viisitoista minuuttia valmisteluineen. Esimerkkinä toimineen funktiogeneraattorin kalibrointiin kuluva aika manuaalisena mittauksena on noin kaksi tuntia, eli kalibrointiin kuluva aika pienentyi yhteen kahdeksasosaan alkuperäisestä.

Funktiogeneraattorin ohjaamiseen tarvittava väyläasetustiedosto on esitelty liitteessä 3. Laitetyypin kalibrointien asetuksista syntyivät seuraavat tiedostot:

- 33120A.ini
- AM modulaatio-pisteet.txt
- AM modulaatio.ini
- Lähtötason taajuusriippuvuus-pisteet.txt
- Lähtötason taajuusriippuvuus.ini
- Lähtötason tarkkuus (50 ohm)-pisteet.txt
- Lähtötason tarkkuus (50 ohm).ini
- Lähtötason tarkkuus (high ohm)-pisteet.txt
- Lähtötason tarkkuus (high ohm).ini
- Lähtötason tarkkuus-pisteet.txt
- Lähtötason tarkkuus.ini
- Taajuustarkkuus-pisteet.txt
- Taajuustarkkuus.ini
- Tasajännitteen tarkkuus-pisteet.txt
- Tasajännitteen tarkkuus.ini

Tiedostojen 33120A.ini, Lähtötason taajuusriippuvuus.ini ja Lähtötason taajuusriippuvuus-pisteet.txt sisällöt on esimerkkinä esitelty liitteessä 4. Kalibroinnin tuloksena syntynyt kalibroitodistus löytyy liitteestä 5.

### 4.4. Ohjelmiston validointi

Akkreditoidun kalibrointilaboratorion pätevyyden vaatimuksiin kuuluu mittauksissa käytettävien menetelmien sekä automatisoitujen kalibrointimittausten validointi. Ohjelmiston validoinnilla varmistetaan, että ohjelmisto toimii oikein ja spesifikaatioiden mukaisesti. Validointi varmistaa myös, että ohjelmisto soveltuu käyttötarkoitukseensa. Oikeiden mittaustulosten varmentamiseksi ohjelmistosta tarkasteltiin seuraavia ominaisuuksia:

- Normaalien käskyjen lähetys mittauslaitteelle
- Makrojen lähetys mittauslaitteelle
- Tuloksien lukeminen mittauslaitteelta
- Matematiikka-toiminnot
- Vaatimusten tarkastelut

Validointi suoritettiin esimerkkinä toimineen funktiogeneraattorin 33120A väyläasetustiedoston avulla. Tuloksien lukeminen validoitiin tarkkuusyleismittarin HP 3458A väylätiedoston avulla. Käskyjä kokeiltiin *wäyläkäsky*-ikkunan *kokeile käskyjä* -painikkeilla. Tällä menetelmällä validoitiin ainoastaan GPIB-väylän toiminta, sillä muunlaisia ohjausväyliä sisältäviä mittauslaitteita ei ollut saatavilla. Muiden väylien toiminnan validointi suoritetaan ensimmäisten tällaisten mittauslaitteiden saapuessa kalibrointiin.

Normaalien asetusten validointi suoritettiin kahdella eri parametrilla. Asetus asetettiin mittauslaitteelle tietokoneen avulla, jonka jälkeen tarkistettiin mittauslaitteesta käsin menikö asetus oikein perille. Taulukossa 4.5 esitellään validoinnin tulokset normaaleille käskyille.

Normaalit asetukset	Parametri	Tulos	Parametri	Tulos
Taajuus="FREQ "	0,01 Hz	OK	1,23456 kHz	OK
Amplitudi="VOLT "	1 Vpp	OK	1,23 Vrms	OK
Offset="VOLT:OFFSET "	0,5 V	OK	10 mV	OK
AM taajuus="AM:INT:FREQ "	5 kHz	OK	1234 Hz	OK
AM syvyys="AM:DEPTH "	33 %	OK	99 %	OK
FM taajuus="FM:INT:FREQ "	5 kHz	OK	1234 Hz	OK
FM deviaatio="FM:DEV "	0,5 kHz	OK	10,0 kHz	OK
Pursketaajuus="BM:INT:RATE "	1,1 kHz	OK	0,22 kHz	OK
Purskeluku="BM:NCYC "	11	OK	500	OK

**Taulukko 4.5** Normaalien asetuksien validoinnin tulokset

Makrojen validointi suoritettiin melko samalla periaatteella. Makroissa ei ole parametrejä, joten ne suoritettiin sellaisenaan. Käskyjen suorittamisen jälkeen tarkistettiin mittauslaitteelta, muuttuivatko laitteen asetukset halutulla tavalla. Makrojen validoinnin tulokset on esitelty taulukossa 4.6.



Makrot	Tulos
Reset=*CLS;*RST	OK
Imp 50="OUTPUT:LOAD 50"	OK
Imp high="OUTPUT:LOAD INF"	OK
Sini="FUNCTION:SHAPE SIN;"	OK
Kantti="FUNCTION:SHAPE SQU;"	OK
Kolmio="FUNCTION:SHAPE TRI;"	OK
Ramppi="FUNCTION:SHAPE RAMP;"	OK
Kohina="FUNCTION:SHAPE NOISE;"	OK
DC="FUNCTION:SHAPE DC;"	OK
AM on="AM:STAT ON"	OK
AM off="AM:STAT OFF"	OK
FM on="FM:STAT ON"	OK
FM off="FM:STAT OFF"	OK
BM on="BM:STAT ON"	OK
BM off="BM:STAT OFF"	OK

**Taulukko 4.6** Makrojen validoinnin tulokset

Tulosten lukemisen validoinnissa käytettiin apuna tarkkuusyleismittaria HP 3458A. Mittaustulos luetaan laitteelta aina samalla käskyllä, riippumatta mittaussuureesta. Mittaustulos luettiin komennolla ”TRIG AUTO”. Tuloksien käsittelyn kannalta eri suureiden lukemiseen laadittiin kuitenkin omat suomenkieliset vastineet. Samalla saatiin myös mittaustuloksen perusyksikkö oikeaksi.

Jännitteen lukemisen validointi suoritettiin asettamalla funktiogeneraattorin asetuksiksi 1 kHz ja 1 Vrms. Ennen mittaustuloksen lukemista yleismittarille suoritettiin seuraavat väyläkäskyt:

```
Reset="RESET"
ACV="FUNC ACV;NPLC 100;SETACV SYNC".
```

Mittaustulokseksi saatiin tällöin tietokoneen avulla 0,99869 V, jonka jälkeen mittaussuoritettiin manuaalisesti. Käsillä mitattuna saatiin mittaustulokseksi 0,99867 V, joka vastaa tietokoneella mitattua tulosta.

Virran lukemisen validointi suoritettiin asettamalla yleismittarikalibraattori Fluke 5101B asetukseksi 500 mA. Ennen mittaustuloksen lukemista yleismittarille suoritettiin seuraavat väyläkäskyt:

```
Reset="RESET"
ACI="FUNC ACI;NPLC 100"
```

Mittaustulokseksi saatiin 0,499946 A tietokoneen avulla ja käsillä mitattuna 0,499940 A. Tulokset vastaavat toisiaan melko tarkasti huomioiden kalibraattorista saatavan virran stabiilisuuden ja yleismittarin spesifikaatiot.

Viimeiseksi tulosten lukemisen validoinnissa valittiin resistanssimittaus, jossa käytettiin myös yleismittarikalibraattoria asetuksella 100 kΩ. Ennen mittaustuloksen lukemista yleismittarille suoritettiin seuraavat väyläkäskyt:

```
Reset="RESET"  
OHM 2W="FUNC OHM;NPLC 100"
```

Mittaustulokseksi saatiin tietokoneen avulla 10 005,6 Ω ja manuaalisesti mitattuna 100,0057 kΩ. Tulokset ovat melkein samat, joten mittaustulosten lukeminen onnistui hyvin.

Matemaattisten funktioiden toimintaa haluttiin tutkia, vaikka vastuu tulosten oikeellisuudesta onkin suurimmalta osalta LabVIEW:n valmistajan, National Instrumentsin vastuulla. Samalla todettiin myös tulosten muotoilun oikeellisuus. Validointia varten luotiin kalibroitirutiineja, joiden suorittamisessa ei kuitenkaan käytetty varsinaisia mittausrakenteita. Taulukon 4.7 sarakkeeseen kommentti valittiin erilaisia lukuja, joista matemaattiset toimenpiteet suoritettiin. Funktiot on lueteltu sarakkeessa *matematiikka* ja tulokset esitelty sarakkeessa *laskun tulos*. Kalibroitirutiini käynnistettiin kuin oikea kalibroitikin, mutta ohjelma siis vain laski *matematiikka*-sarakkeen soluille oikeat arvot. Toiseksi viimeisen rivin funktiossa ei ole määriteltynä muotoilua, joten tuloksessa on kuusi desimaalia ilman yksikköä. Viimeisessä funktiossa muotoiluun valittiin vain yksikkö, joten senkin tuloksessa on kuusi desimaalia. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että matematiikka toimii oikein ja halutulla tavalla.

Kommentti	Matematiikka	Laskun tulos	Tulos
1 V	=R1C1-R2C1;0,0 mV	999,0 mV	OK
1,0 mV	=20*log(R2C1/R1C1);0,0 dB	-60,0 dB	OK
0 dBm	=10^(R2C1/20)*(sqrt(50*0,001)); 0,00 mV	223,63 mV	OK
-20,01 dBm	=R3C1+R4C1+R5C1	-30,120000	OK
-10,11 dBm	=(R2C1/R1C1)*100; %	0,100000 %	OK

Taulukko 4.7 Matematiikan validoinnin tulokset

Vaatimustenmukaisuuksien tarkastelun validoinnissa jaettiin testitapaukset kahteen eri mittausrutiiniin. Ensimmäisessä rutiinissa tarkasteltiin minimi- ja maksimiarvojen käytön oikeellisuutta ja toisessa ±vaatimusten käyttöä. Taulukossa 4.8 on esitelty ensimmäisen mittausrutiinin asetukset ja tulokset. Vaatimusten mukaisuus tarkistetaan vain *matematiikka*- ja *tulos*-sarakkeista, joten testitapauksen *matematiikka*-sarake vain kopioi *kommentti*-sarakkeen solut omiin soluihinsa. Tässä tapauksessa ei käytetty minkäänlaisia muotoiluja. Kalibroitirutiini ajettiin läpi, jolloin kunkin *matematiikka*-sarakkeen soluja verrattiin mahdollisiin min- ja max arvoihin. Jos auki laskettu tulos oli min- ja max-rajojen ulkopuolella, ohjelmisto lisäsi tuloksen perään tähtimerkin. Rajat valittiin siten, että joka toinen rivi oikein toimiessaan menisi tarkastelusta läpi ja joka toinen rivi ei. Testiajon päätyttyä todettiin, että tarkastelu toimii oikein.



Kommentti	Min	Matematiikka	Max	Laskun tulos	Tulos
1 V	0,9 V	=R1C1	1,1 V	1,000000	OK
1,100001 V	0,9 V	=R2C1	1,1 V	1,100001 *	OK
5 H	4000 mH	=R3C1	0,006 kH	5,000000	OK
7 H	4000 mH	=R4C1	0,006 kH	7,000000 *	OK
-80 dBm		=R5C1	-70 dBm	-80,000000	OK
-65 dBm		=R6C1	-70 dBm	-65,000000 *	OK

Taulukko 4.8 Min- ja max-vaatimusten tarkastelun validoinnin tulokset

±Vaatimusten tarkastelun validoinnissa käytettiin hieman erilaista mittausrutiinia, sillä ±vaatimukset lasketaan ensin joistain referenssiarvoista. Nämä arvot pitää löytyä mittaustaulukon *asetus*-sarakeesta. *Matematiikka*-sarake kopioi kommentti-sarakkeen solut omiin soluihinsa, jonka jälkeen ohjelmisto laski ±vaatimuksista ja *asetus*-sarakeen soluista minimi- ja maksimi-rajat lasketuille tuloksille. Rajat valittiin tässäkin tapauksessa siten, että joka toinen rivi oikein toimiessaan menisi tarkastelusta läpi ja joka toinen rivi ei. Testiajon päätyttyä todettiin, että myös ±vaatimusten tarkastelu toimii oikein. Testiajon tulokset ovat taulukossa 4.9.

Asetus	Kommentti	Matematiikka	±Vaatimus	Laskun tulos	Tulos
1 V	1,002 V	=R1C2	0,01 V	1,002000	OK
1 V	1,011 V	=R2C2	0,01 V	1,011000 *	OK
5 H	4,9 H	=R3C2	0,1 H	4,900000	OK
5 H	5,9999 H	=R4C2	0,1 H	5,999900 *	OK
-30 dB	-30,0006 dB	=R5C2	0,01 dB	-30,000600	OK
-30 dB	-30,0165 dB	=R6C2	0,01 dB	-30,016500 *	OK

Taulukko 4.9 ±Vaatimusten tarkastelun validoinnin tulokset

## 4.5. Ohjelmiston käytettävyys

Ohjelmiston kehityksen apuvälineenä käytettiin Nielsenin ja Molichin kymmentä heuristista sääntöä, jotka esiteltiin kappaleessa 3.6.3. Varsinkin ohjelmiston käyttöliittymää suunniteltaessa yritettiin mahdollisimman tarkasti noudattaa näitä sääntöjä. Lisäksi kiinnitettiin huomiota käyttöliittymän visuaaliseen suunnitteluun, eli lähinnä värien käyttöön, elementtien sijoitteluun ja typografiaan. Yleisesti käyttöliittymä pyrittiin tekemään kauttaaltaan yhdenmukaiseksi. Esimerkiksi kalibroittavan mittauslaitetyypin valinta tapahtuu täysin samalla tavalla kuin kyseisten asetusten avaaminen. Poistumistiet merkittiin *ok*-, *peruuta*-, ja *palaa takaisin* -painikkeilla.

Ohjelmiston aliohjelmien käyttöliittymät on rakennettu mahdollisimman yksinkertaisiksi, mutta samalla havainnollisiksi. Ohjelmistossa käytetään paljon valikkorakenteita, jotta näytölle saadaan vain haluttu tieto. Esimerkiksi pääikkunassa eri asetuksia ei ole eritelty, vaan yhdellä painikkeella päästään asetuksille varattuun valikkoon, josta päästään taas eteenpäin erilaisiin asetuksiin. *Väylän asetukset* -ikkunassa näytetään vastaavasti vain yksinkertaisimmat asetukset laitetyypille ja harvemmin tarvittavat säätimet on piilotettu *lisäasetukset*-painikkeen taakse.

Käyttäjän muistikuormaa pyrittiin pienentämään erityisesti *kalibroinnin mittauspisteet* -ikkunassa, jossa valikkoihin ladataan automaattisesti kunkin mittauslaitetyypin asetukset. Kun asetukset löytyvät luettelosta, käyttäjän on helppo valita oikea vaihtoehto. Vastaavasti kalibrointien mittauksia valitessa näytetään ikkunan alalaidassa mittauksessa tarvittavat laitteet, joten käyttäjän ei tarvitse muistella niitä tai kysyä niitä ohjelmalta erikseen. Makrojen nimiä ohjelmisto ei näytä suoraan, mutta tätä varten ikkunoissa on *makrot*-painike, jolla saadaan lista mittauslaitteiden makroista esille.

*Kalibrointi*-ikkunan käytettävyys haluttiin panostaa, sillä sitä tullaan käyttämään luultavasti eniten. Kuten monissa muissakin ikkunoissa, tämänkin ikkunan koko muuttuu automaattisesti oikeaan kokoon. Kalibrointi voi kestää pitkänkin ajan, joten ohjelma näyttää ikkunan alalaidassa arvion mittauksen jäljellä olevasta kestosta. Kalibrointi voidaan lisäksi keskeyttää koska vain *keskeytä*-painikkeella, joka on muista painikkeista poiketen punaisen värinen, jotta se erottuisi varmasti. Lisäksi ikkunassa, jossa valitaan kalibroinnit, on erillinen tekstikenttä, jossa kerrotaan mitä ohjelmisto on tekemässä. Mittauslaitteiden etsiminen väylältä kestää muutaman sekunnin, joten ohjelma ilmoittaa käyttäjälle tästä.

LabVIEW-pohjaista ohjelmistoa käytetään yleensä hiirellä, mutta edistyneempiä käyttäjiä varten ohjelman käyttö näppäimistöltä on myös mahdollista. Ohjelmistossa voidaan siirtyä käyttöliittymän elementistä toiseen tabulaattori-painikkeella ja ohjelmiston ikkunoista tarkistettiin, että vaihto elementistä toiseen tapahtuu loogisessa järjestyksessä. Ohjelmiston listoja voidaan lisäksi kaksoisnäpäyttää hiirellä, jolloin ohjelmisto suorittaa jonkin toimenpiteen listasta valitulle kohteelle. Näitä toimenpiteitä ovat esimerkiksi laiteryhmän- ja tyyppin valitseminen muualle ohjelmaan.



Ohjelmiston virheiden käsittelyä varten luotiin aliohjelma, joka antaa mahdolliset virheilmoitukset suomenkielisesti. Virheilmoituksia varten aliohjelmaan tulee antaa parametrina myös mahdollisen virheen lähde, joka voidaan tällöin ilmoittaa käyttäjälle. Ohjelmisto pyrkii tietenkin mahdollisimman pitkälle välttämään virheitä, mutta aina se ei ole mahdollista.

Varsinaista ohjelmistokoodia pyrittiin rakentamaan myös mahdollisimman selkeästi, jotta ohjelmistoa olisi tarvittaessa mahdollista muuttaa melko helposti. Parametrien nimet pyrittiin valitsemaan sellaisiksi, että ne kuvaisivat niiden toimintaa hyvin. Ohjelmistokoodia kommentoitiin myös joiltain osin, sillä graafisella ohjelmointityökalulla tehty lähdekoodi ei ole luettavuudeltaan vaativissa sovelluksissa kovin hyvä. Lisäksi ohjelmistossa syntyneiden aliohjelmien ikonien värit valittiin sellaisiksi, että ne kuvaisivat aliohjelmien toimintaa. Kuvan 4.20 mukaisesti käyttäjälle näkyvät aliohjelmat merkittiin keltaisella, kalibrointiin liittyvät käyttäjälle näkyvät aliohjelmat ruskealla ja kaikki muut aliohjelmat sinisellä.



Käyttäjälle näkyvät  
aliohjelmat



Kalibroinnin  
aliohjelmat



Muut  
aliohjelmat

**Kuva 4.20** Aliohjelmien ikonien värit

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä kehitettiin yleiskäyttöinen kalibrointiohjelmisto, jonka avulla voidaan kalibroida automaattisesti hyvin erilaisia mittauslaitteita. Kalibroitavien mittauslaitteiden ohjausväyläksi soveltuu GPIB-, VXI-, LAN- tai sarjaväylä. Ohjelmiston avulla on mahdollista kalibroida myös sellaisia mittauslaitteita, joissa ei ole erillistä ohjausväylää. Ohjelmisto ei ole rajoittunut mihinkään erityisiin mittausmenetelmiin, vaan ohjelmiston käyttäjällä on täydet mahdollisuudet luoda haluamiaan mittausrutiineja.

Ohjelmiston avulla luodaan kullekin mittauslaitteelle väyläasetustiedosto eli ajuri, jonka avulla laitetta ohjataan. Ajuri sisältää tiedot ohjausväylästä ja sen asetuksista sekä mittauslaitteen ohjaamisessa tarvittavat käskyt, joille valitaan suomenkieliset vastinenimet. Mittauslaitteiden ajureita voidaan käyttää ohjelmistossa aina uudelleen, joten väyläkäskyjen asetukset tarvitsee asettaa vain kerran, jonka jälkeen ne ovat käytettävissä kaikissa mittauksissa.

Kalibrointirutiinien tekeminen ohjelmiston avulla on erityisen vaivatonta, sillä mittauslaitteen ajurin avulla niiden käskyt luotellaan selvällä suomen kielellä yhdessä listassa, josta halutun asetuksen valitseminen on helppoa. Asetuksien mahdolliset parametrit voidaan lisäksi antaa täysin SI-järjestelmän yksikköihin ja kerrannaisyksikköihin perustuen. Ohjelmiston avulla kattavien kalibrointiohjelmien tekeminen on todella nopeata verrattuna perinteiseen ohjelmointiin. Ohjelmisto nopeuttaa kalibrointien suorituksen lisäksi myös tulosten käsittelyä, sillä sen avulla on mahdollista tallentaa mittautulokset suoraan valmiiseen kalibrointitodistukseen.

Esimerkkinä työssä tehtiin kalibrointiohjelma funktiogeneraattorille HP 33120A, jolle rakennettiin seitsemän erillistä mittausta. Tarvittavien asetusten tekemiseen kulunut aika oli vain murto-osa normaalista ohjelmointiajasta, joten työn voidaan sanoa onnistuneen odotusten mukaisesti. Itse kalibrointiin kuluva aika laski kahdeksasosaan manuaaliseen mittaukseen verrattuna.

Akkreditoidulta kalibrointilaboratoriolta vaaditaan kalibrointiohjelmistojen validointia, joka suoritettiin tehdylle ohjelmistolle. Validoinnissa vertailtiin esimerkkilaitteen toimintaa tietokoneohjattuna ja manuaalisesti. Lisäksi ohjelmiston mittautulosten vaatimusten tarkastelun toimivuus ja matemaattisten toimenpiteiden toiminta validoitiin, jotta mittautuloksiin voitaisiin luottaa. Validoinnin tuloksena todettiin ohjelmiston toimivan oikein testatuilta osiltaan. Ohjausväylästä ei pystytty validoimaan kuin GPIB-väylän toiminta, sillä muunlaisia ohjausväyliä ei ollut saatavana. Tulevaisuutta ajatellen, uusien väylätyyppien lisääminen ohjelmistoon on täysin mahdollista.



## 6. LÄHDELUETTELO

- [1] Fluke Corporation, Calibration: Philosophy in Practice, Everett 1994
- [2] ISO/IEC 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, Geneve 1999
- [3] SFS-EN ISO/IEC 17025: Testaus- ja kalibrointilaboratorioiden pätevyys. Yleiset vaatimukset, Helsinki 2000
- [4] Finas, Päätos P1a/2001: Akkreditointitoiminnassa noudatettavat vaatimukset, Helsinki 2001
- [5] EA-4/02: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, 1999
- [6] EA-4/07: Traceability of Measuring and Test Equipment to National Standards, 1995
- [7] ILAC-G2:1994: Traceability of Measurements, 1994
- [8] BIPM, The International System of Units (SI), 1998
- [9] Mittatekniikan Keskus, Tasajännitteen kalibrointi, esite, 2002
- [10] SFS-Käsikirja 153: Staattisen sähkön hallinta elektroniikka-teollisuudessa, Helsinki 2002
- [11] Kotel Tutkimusraportti 218: Staattisen sähkön (ESD) vaikutukset elektroniikkalaitteille, 1993
- [12] Toni Viheriäkoski, ESD Staattinen sähkö elektroniikassa, Helsinki 2001
- [13] Kirsi Voipio, Seppo Uusitupa, Tietoliikenneaapinen – Teletekniikkaa ymmärrettävästi, Helsinki, 1999
- [14] Seppo J. Halme, Televiestintäjärjestelmät, Helsinki, 1998
- [15] Pekka Wallin, Sähkömittaustekniikan perusteet, Espoo 1998
- [16] Niko Kettunen, Mittauslaiteajurit ja niiden käyttö tuotannon testausjärjestelmissä ja räätälöidyissä mittausohjelmistoissa, Diplomityö, TKK, 1997
- [17] Insinööritieto Oy, Sähkömittaukset ja mittauslaitteet, 1986

- 
- [18] National Instruments, GPIB Tutorial, 1996
  - [19] National Instruments: Tim Dehne ja Laura Golla, Application Note 047, Increasing Test System Compatibility and Productivity with IEEE 488.2, 1993
  - [20] Tomi Engdahl, RS-232C sarjaliitanta IBM PS/AT:ssa ja yhteensopivissa, 1993
  - [21] National Instruments, LabVIEW Measurements Manual, 2002
  - [22] National Instruments: Ron Wolfe, Application Note 030, Short Tutorial on VXI/MXI, 1996
  - [23] National Instruments, Evaluating PXI and VXI Platforms for your Measurement and Automation Needs, 2002
  - [24] PXI Systems Alliance, PXI Specification, An Implementation of CompactPCI, 2000
  - [25] SCPI Consortium, Standard Commands for Programmable Instruments: Volume 1: Syntax and Style, 1999
  - [26] NPL: JT Janssen, Design of Automated Measurement Systems for Metrology, DC & LF Club Meeting, 2002
  - [27] ISO/IEC 9126 Software Engineering - Product Quality - Quality Model and Metrics, Geneva 2001
  - [28] Mika Saarijärvi, Automaatio-ohjelmistojen kehittäminen ja sen kehittämistä tukevia menetelmiä, Diplomityö, TKK, 2000
  - [29] SFS-EN ISO 9241-11, Näyttöpäätteillä tehtävän toimistotyön ergonomiset vaatimukset – Osa 11: Käytettävyyden määrittely ja arviointi, 1998
  - [30] Jakob Nielsen, Usability Engineering, 1993
  - [31] Kari-Matti Kokko, Käyttäjakeskeinen järjestelmäkehitys pienyritysympäristössä, Diplomityö, TKK, 2001
  - [32] ISO 9000-3, Quality management and quality assurance standards - Part 3: Guidelines for the application of ISO 9001:1994 to the development, supply, installation and maintenance of computer software, Geneva 1997
  - [33] Suomen standardisoimisliitto SFS, SI-Opas, Suureet ja yksiköt. SI-mittayksikköjärjestelmä, Helsinki 2001



# KALIBROINTIOHJELMISTON ALIOHJELMAT

## Käyttäjälle näkyvät aliohjelmat

### Pääohjelma.vi



Käynnistää kalibrintiohjelmiston. Toimii pääikkunana ohjelmiston kaikille toiminnoille. Painikkeista *DUT-info*, *Kalibrointi* ja *Asetukset* päästään vastaaviin ikkunoihin. *Lopeta*-painike pysäyttää ohjelman ja poistuu siitä.

### DUT-info.vi



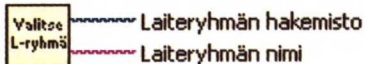
Aliohjelman avulla valitaan kalibroitavan mittauslaitteen tyyppi sekä kerätään tiedot kalibrointitodistusta varten.

### Valitse kalibroitava laitetyyppi.vi



Avaa valintalistan mahdollisista mittauslaitteista, joita voidaan kalibroida. Palauttaa valitun laitetyypin ja laitetyypin ryhmän.

### Valitse laiteryhmä.vi



Avaa valintalistan mahdollisista mittauslaiteryhmistä, joihin on määriteltä laitetyyppejä. Palauttaa valitun ryhmän nimen sekä ryhmän hakemiston.

### Etsi laitetyyppi.vi



Etsii laitetyyppejä eli hakemistoja alkaen parametrin määrittelemästä alkuhakemistosta. Palauttaa haun tuloksista valitun laitetyypin, sen laiteryhmän ja laitetyypin hakemiston.

### Asetukset.vi



Ikkuna toimii valikkona kaikille ohjelmiston asetuksille. Painikkeilla *hakemistot*, *kalibrointien asetukset* ja *väylän asetukset* päästään niitä vastaaviin ikkunoihin.

## Hakemistojen asetukset.vi

Hakem.  
Asetus

Aliohjelman avulla määritellään ohjelmiston tarvitsemat hakemistot. Tiedot hakemistoista haetaan tiedostosta CP.ini ja ne tallennetaan mahdollisten muutoksien jälkeen samaan tiedostoon.

## Kalibrointien asetukset.vi

Kalibr.  
Asetus

Aliohjelman käyttöliittymä on hyvin samankaltainen aliohjelman Valitse kalibroitava laitetyyppi.vi kanssa. Tässä ikkunassa voidaan kuitenkin luoda uusia laiteryhmiä ja laitetyyppejä. Laiteryhmien poistaminen ei ole mahdollista turvallisuussyistä, mutta yksittäisten laitetyyppien poistaminen onnistuu aliohjelman avulla. Ikkunan painikkeella *muokkaa*, voidaan muokata valitun laitetyypin kalibroinnin tietoja.

## Väyläasetukset.vi

Väylä  
asetus

Aliohjelman avulla voidaan muokata laitetyypin väyläasetustiedostoa. Ikkunan sisältö on yksinkertainen; ainoastaan laitetyypin nimitietoja, väylän tyyppiä ja osoitetta voidaan vaihtaa. Väyläkäskyjen asetuksiin ja lisäasetuksiin päästään tämän ikkunan avulla.

## Laitetyypin asetukset.vi

Laitetyypin hakemisto ~~~~~ Tyypin  
Laitetyyppi ~~~~~ Asetus

Aliohjelma luettelee parametrien määrittelemän laitetyypin kaikki määritellyt mittaukset, joita voidaan muokata ulkopuolisilla aliohjelmilla. Aliohjelman käyttöliittymä toimii pääikkunana yhden laitetyypin kalibrointien asetuksille. Aliohjelman avulla voidaan lisätä, poistaa ja muokata mittauksia.

## Kalibroinnin mittauspisteet.vi

Asetukset sisään ~~~~~ Kalibr. ~~~~~ Asetukset ulos  
Mittauksen numero ..... pisteet ..... OK

Aliohjelma saa parametreina kalibroinnissa tarvittavat tiedot, joiden mukaan ikkunan käyttöliittymä rakennetaan. Mittauksen numero kertoo mikä laitetyypin mittauksista on valittu muokattavaksi. Aliohjelmalla voidaan muokata mittauspisteitä, niiden sarakkeiden nimiä, tulostuksen asetuksia, alkuasetuksia ja viivettä. Lisäksi ladattuja mittauspisteitä voidaan kokeilla käytännössä. Palauttaa muokatut asetukset ja tiedon onko *ok*-painiketta painettu.

## Ohjeiden asetukset.vi

Ohjekuva ~~~~~ Ohje ~~~~~ Ohjekuva ulos  
Ohjeteksti sisään ~~~~~ asetukset ~~~~~ Ohjeteksti ulos

Muokkaa yhden mittauksen ohjeiden asetuksia. Saa parametreinaan kuvan hakemiston ja ohjetekstin, jotka palautetaan aliohjelman päätyttyä.

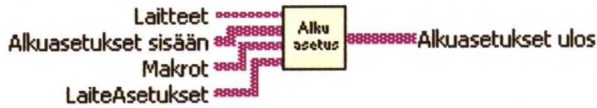


### Mittauksessa tarvittavat laitteet (asetukset).vi



Aliohjelman avulla valitaan mittauksessa tarvittavat mittauslaitteet. Parametrina kaikkien mittausten laitteet, josta palautetaan muokattu lista. Mittauksen nimen avulla valitaan muokattavan mittauksen laitteet.

### Alkuasetukset.vi



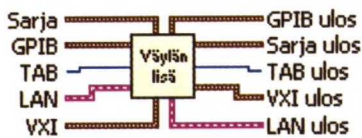
Aliohjelman avulla voidaan muokata yhden mittauksen alussa suoritettavia alkuasetuksia mittauslaitteille. Parametreinaan aliohjelma saa listan mittauslaitteista, muokattavat alkuasetukset, luettelon makroista sekä laitteiden mahdollisista asetuksista. Palauttaa muokatut alkuasetukset.

### Makro-ohje.vi



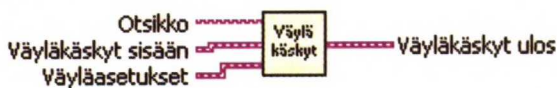
Aliohjelma näyttää parametreina saatujen laitteiden mahdolliset makrot taulukossa käyttäjän avuksi.

### Väylän lisäasetukset.vi



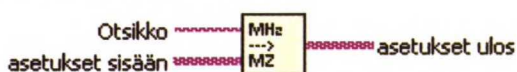
Aliohjelmalla päästään muokkaamaan väyläasetustiedoston ohjausväylien edistyneitä asetuksia. Ohjelma saa parametreina väylien asetukset ja palauttaa muokatut asetukset.

### Väyläkäskyt.vi



Aliohjelman avulla voidaan muokata väyläasetustiedoston käskyjä. Käskyjä ovat normaalit käskyt, makrot ja tuloksien lukemiseen tarvittavat käskyt. Parametreinaan aliohjelma saa mittauksen otsikon, muokattavat väyläkäskyt sekä laitteen ohjaamiseen tarvittavat tiedot. Käyttöliittymän avulla voidaan myös kokeilla muokattuja asetuksia mittauslaitteelle. Palauttaa muokatut väyläkäskyt.

### Yksiköiden muunto.vi



Aliohjelman avulla voidaan muokata väyläkäskyjen yksiköiden muunnoksessa tarvittavia sääntöjä. Parametreinaan aliohjelma saa mittauksen otsikon sekä asetukset muunnoksista ja palauttaa muokatut asetukset.

### Kysy tekstiä.vi



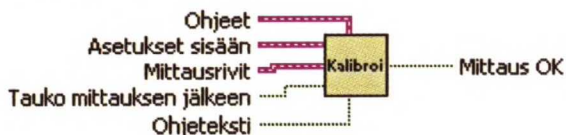
Yleinen apuohjelma, joka kysyy tekstiä parametrina määritellyn otsikon avulla. Ohjelmalle voidaan antaa parametrina oletusarvo kysyttävästä tekstistä. Palauttaa annettun / muokatun tekstin jos *ok*-painiketta on painettu.

### Valitse kalibroinnit.vi



Avaa ikkunan, jossa luetellaan *DUT-info*-ikkunassa määritellyn mittauslaitteen kalibrointiin kuuluvat mittaukset. Mittauksista voidaan valita suoritettavaksi yksi tai useampia tai kaikki mittaukset. Aliohjelman avulla voidaan myös tallentaa saadut mittauks tulokset txt-, doc-, tai xls-muotoon.

### Kalibrointi.vi



Varsinainen *kalibrointi*-ikkuna, jonka avulla laitteen suorituskyky tarkistetaan. Aliohjelma saa parametreinaan kaikki mittaukseen liittyvät tiedot eli ohjeet, asetukset ja mittauspisteet. Lisäksi parametreina annetaan boolean-tyyppiset tiedot tauosta mittauksen jälkeen ja näytetäänkö ohjeteksti. Jos mittaus on täyttänyt mahdolliset vaatimukset eikä *keskeytä*-painiketta ole painettu, aliohjelma palauttaa arvonaan loogisen tosi-arvon. Jos näin ei ole, ohjelma palauttaa epätosi-arvon. Mittauksen jälkeen tulokset tallennetaan tilapäistiedostoon, jos mittausta ei keskeytetä.

### Mittausohjeet.vi

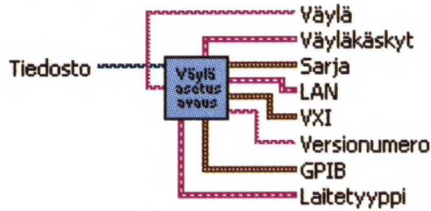


Näyttää tiedot kalibrointiin liittyvistä ohjeista. Parametreinaan aliohjelma saa kuvan hakemiston ja ohjetekstin.



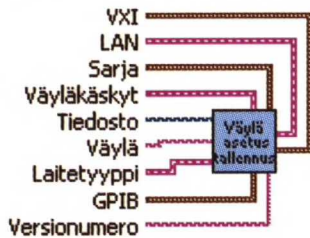
## Muut aliohjelmat

### Väyläasetusten avaaminen.vi



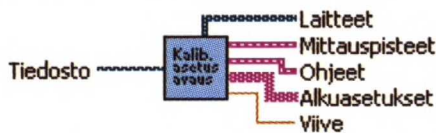
Avaa parametrin määrittelemän väyläasetustiedoston ja muuntaa tiedoston sisällön sellaiseksi, että sitä voidaan käyttää mittauslaitteen ohjaamiseen tiedoston määrittelemillä käskyillä. Avaa myös samasta tiedostosta siihen tallennettujen ohjausväylien kaikki asetukset ja tiedon valitusta väylästä. Palauttaa väyläkäsyt, väylien tiedot, valitun väylän, mittauslaitteen tiedot ja tiedoston versionumeron.

### Väyläasetusten tallentaminen.vi



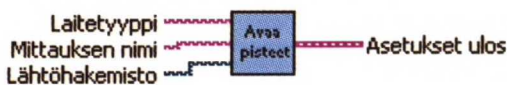
Tallentaa parametreina saadut väyläasetukset parametrina saatuun tiedostoon.

### Kalibroinnin asetusten avaaminen.vi



Avaa parametrina saadusta tiedostosta yhden kalibrointimittauksen kaikki asetukset. Palauttaa mittauksen laitteiden asetukset, mittauspisteet, ohjeet, mittauksen alkuasetukset sekä mittauksen viiveen.

### Mittauspisteiden avaaminen.vi



Avaa parametrina saadusta lähtöhakemistosta, laitetypin ja mittauksen nimestä päätelystä tiedostosta kalibroinnin mittauspisteet ja mittauksen asetukset. Palauttaa ladatut asetukset.

### Kalibroinnin asetusten tallennus.vi



Tallentaa parametrina saatuun hakemistoon yhden mittauslaitteen kalibroinnissa tarvittavien mittausten kaikki asetukset. Parametreina lisäksi mittausten nimet, asetukset ja ohjeet.

### Väyläkäskyn suorittaminen.vi



Suorittaa parametrina saaduista asetuksista valitun käskyn, jonka voidaan mahdollisesti antaa jokin parametri. Parametrina voidaan antaa looginen tosi-arvo, jos käskyn avulla halutaan lukea mittaustulos. Palauttaa tässä tapauksessa muotoillun mittaustuloksen tekstimuodossa sekä numeerisessa muodossa.

### SI-yksiköiden muunto.vi



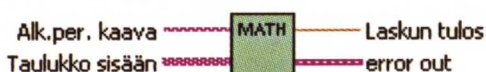
Muuntaa mahdollisesti kerrannaisyksikössä olevan tekstimuotoiseen lukuarvon SI-järjestelmän mukaisesti numeeriseen muotoon. Palauttaa myös kerrannaisyksiköstä johdetun perusyksikön. Muunnoksessa käytetään vain SI-kerrannaisyksiköitä, jotka ovat 3:lla jaollisia (ns. engineering-luvut), eli kerrannaisia hehto, deka, desi ja sentti ei muunneta. Lisäksi minuutteja ei muunneta.

### SI-yksiköiden muunto (käänteinen).vi



Muuntaa parametrina saadun numeerisen mittaustuloksen tekstimuotoon. Tuloksesta muotoillaan desimaalien määrä sekä yksikkö, joka voi olla jokin SI-järjestelmän mukaisessa kerrannaisyksikössä. Muunnoksessa käytetään vain SI-kerrannaisyksiköitä, jotka ovat 3:lla jaollisia (ns. engineering-luvut), eli kerrannaisia hehto, deka, desi ja sentti ei muunneta. Lisäksi minuutteja ei muunneta.

### kaavamuunnos.vi



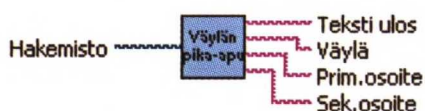
Muuntaa parametrina saadun matemaattisen kaavan LabVIEW:n ymmärtämään muotoon ja laskee laskun parametrina saadusta taulukosta. Palauttaa laskun tuloksen numeerisessa muodossa sekä mahdollisesti syntyneet virheet.

### Mittausten nimien asetukset.vi



Tallentaa tai avaa asetustiedostossa sijaitsevien mittauksen nimet ja niiden kytkennät.

### Väylän apu-teksti.vi



Avaa parametrin määrittelemästä tiedostosta väyläasetukset ja palauttaa tiedot mittauslaitteen väylästä ja sen osoitteesta.



### Word-Avaaminen.vi



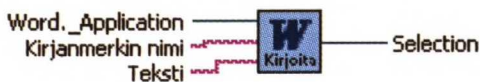
Avaa ActiveX:llä parametrina saadun dokumenttipohjan Wordiin. Palauttaa tiedon avoimen ohjelman sekä dokumentin referenssinumeroista.

### Word-Aseta kirjanmerkki.vi



Asettaa parametrissa määriteltyyn avoimeen Word-tiedostoon kirjamerkin parametrin *teksti* perusteella. Palauttaa tiedon aliohjelman avulla määrittelystä alueen referenssinumerosta.

### Word-Kirjoita kirjanmerkkiin.vi



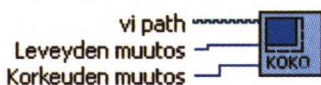
Korvaa parametrissa määriteltyyn avoimen Word-tiedostoon kirjamerkin parametrin *teksti* perusteella. Kirjanmerkin kirjoituksen jälkeen kirjanmerkki on poistettu dokumentista. Palauttaa tiedon aliohjelman avulla määrittelystä alueen referenssinumerosta.

### Excel-Muunnos TXT-XLS.vi



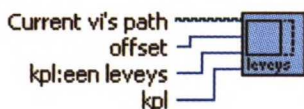
Tallentaa parametrina saatuun tiedostoon halutun tekstin. Luo ensin tilapäistiedoston, avaa sen Exceliin, tallentaa Excel-tiedoston ja tuhoaa tilapäistiedoston.

### Ikkunan koon muutos.vi



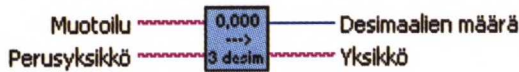
Muuttaa parametrina saadun aliohjelman ikkunan fyysistä kokoa parametrien *leveyden ja korkeuden muutos* verran.

### Ikkunan leveys.vi



Muuttaa parametrina saadun aliohjelman ikkunan leveyttä haluttuun. Parametri *offset* määrittelee ikkunan alkukoon, *kpl:een leveys* yhden elementin leveyden ja *kpl* elementtien lukumäärän. Ikkunan leveydeksi määritellään tällöin  $offset + kpl * leveys$ .

### Desimaalien määrä.vi



Laskee desimaalien määrän parametrina saadusta muotoilusta. Tällöin muotoilusta 0,0000 saadaan neljä desimaalia. Palauttaa parametrin *perusyksikkö* yksikkönä, jos muotoilu on määritelty

### Taulukkojen yhdistäminen.vi



Yhdistää kaksi taulukkoa yhdeksi.

### Tyhjien solujen poisto taulukosta.vi



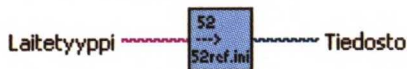
Poistaa tekstimuotoisesta taulukosta tyhjät solut.

### Virheiden käsittely.vi



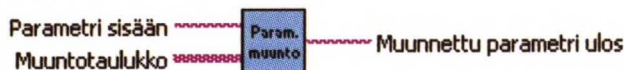
Antaa suomenkielisen virheilmoituksen, jos jokin virhe on sattunut. Parametri *Mahd.virhelähde* annetaan virheilmoituksessa virheen aiheuttajana. Palauttaa virheen myös eteenpäin käsiteltäväksi.

### Etsi laitetyyppitiedosto.vi



Hakee parametrin *Laitetyyppi* määrittelemää väyläasetustiedostoa, joka palautetaan sen löytyessä. Jos tätä ei löydy, etsitään jotain vastaavaa tiedostoa, muodoltaan *\*laitetyyppi\*.ini*.

### Käskyn parametrin muunto.vi



Hakee parametrina saadusta muuntotaulukosta arvoa *parametri sisään* ja palauttaa kyseisen rivin toisen sarakkeen arvon.

### Kalibroinnin asetusten muunto.vi



Muuttaa kalibrointien asetustiedostosta asetukset ohjelman ymmärtämään muotoon.



### Tyhjien solujen poisto 1D-(path)-taulukosta.vi



Poistaa hakemisto-tyyppisestä taulukosta tyhjiä soluja alkaen alusta. Törmättäessä ensimmäiseen tyhjään soluun poistetaan kaikki sen jälkeiset solut.

### Tyhjien solujen poisto 1D-(single+string)-taulukosta.vi



Poistaa numeerisesta ja tekstimuotoisesta taulukoista tyhjiä soluja alkaen alusta. Törmättäessä ensimmäiseen tyhjään soluun poistetaan kaikki sen jälkeiset solut.

### Sarake taulukosta (tyhjät solut pois).vi



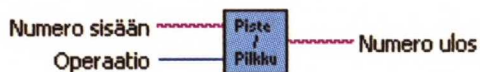
Valitsee parametrina saadusta taulukosta yhden sarakkeen ja poistaa siitä tyhjät solu alkaen alusta. Törmättäessä ensimmäiseen tyhjään soluun poistetaan kaikki sen jälkeiset solut.

### Käskyn muunto laitteelle.vi



Hakee parametrina saadusta taulukosta arvoa *käskyn nimi* ja palauttaa kyseisen rivin toisen sarakkeen arvon.

### Pisteen ja pilkun vaihto.vi



Muuttaa parametrissa *Numero sisään* pilkun pisteeksi jos *Operaatio* on 0 ja pisteen pilkuksi, jos *Operaatio* on 1

### Plus-miinus vaatimuksista min-max arvoihin.vi



Laskee parametrissa *Rivi* parametrin *Vaatimus sisään* määrittelemät minimi- ja maksimi-arvot mittaukselle. Parametrissa *Sarakkeiden nimet* haetaan asetus-saraketta, josta vaatimukset lasketaan.

### Muodosta kalibroinnin tilapäistiedoston nimi.vi



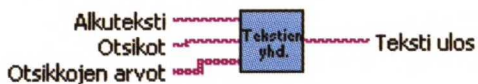
Muodostaa mittauksen otsikosta tilapäistiedoston nimen.

**Muodosta kalibroinnin tilapäishakemisto.vi**

Muodostaa parametrissa tilapäishakemiston nimen.

**Poista duplikaatit 1D-taulukosta.vi**

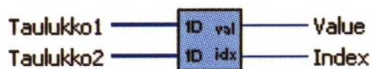
Poistaa taulukosta samanlaiset alkiot ja palauttaa puhdistetun taulukon.

**Tekstien yhdistäminen.vi**

Yhdistää parametreina saadut tekstit mittaustaulukon otsikoiksi.

**Sarakkeet 10-boolean taulukoksi.vi**

Luo kymmen-soluisen boolean-tyyppisen taulukon, jonka parametrin *Sarakkeet* määrittämä määrä tosi-arvoisia soluja alussa. Loput epätosia.

**Etsi muuttuneet taulukosta.vi**

Ilmoittaa parametreina saatujen numeeristen taulukkojen eron. Palauttaa rivin numeron ja vastaavan solun arvon taulukosta yksi.

**1 to 2 & 2 to 1.vi**

Muuttaa numeron yksi numeroksi kaksi ja numeron kaksi numeroksi 1.

**Väyläasetuksen tiedostonimi.vi**

Muuttaa parametrina saadun hakemiston, jos sellainen on fyysisesti olemassa. Palauttaa myös arvon löytyikö tiedosto.



## Matemaattiset funktiot

### Operaattorit

?:	ehdollinen arviointi
	looginen tai
&&	looginen ja
	tai biteille
^	ekslusiivinen tai biteille (myös eksponenttiin korottaminen)
&	ja biteille
!=, ==	erisuuruus, yhtäsuuruus
>, <, >=, <=	suurempi, pienempi, suurempi tai sama, pienempi tai sama
>>, <<	siirto oikealle, siirto vasemmalle
+, -	yhteenlasku, vähentäminen
*, /	kertominen, jakaminen
**	eksponenttiin korottaminen
!, ~, ++, and --	looginen ei, bitin komplementti, lisääminen, vähennys

### Funktiot

abs(x)	Itseisarvo arvosta x	
acos(x)	Kosinin käänteisfunktio arvosta x	
acosh(x)	Hyperbolisen kosinin käänteisfunktio arvosta x	
asin(x)	Sinin käänteisfunktio arvosta x	
asinh(x)	Hyperbolisen sinin käänteisfunktio arvosta x	
atan(x)	Tangentin käänteisfunktio arvosta x	
atanh(x)	Hyperbolisen tangentin käänteisfunktio arvosta x	
ceil(x)	Pyöristäminen ylöspäin arvosta x	
cos(x)	Kosini arvosta x	
cosh(x)	Hyperbolinen kosini arvosta x	
cot(x)	Kotangentti arvosta x	(1/tan(x))
csc(x)	Kosekanti arvosta x	(1/sin(x))
exp(x)	Eksponenttifunktio arvosta x	(e^x)
expm1(x)	Eksponenttifunktio arvosta x-1	(e^(x-1))

<code>floor(x)</code>	Pyöristäminen alaspäin arvosta x	
<code>getexp(x)</code>	Arvon x eksponentti	
<code>getman(x)</code>	Arvon x mantissa	
<code>int(x)</code>	Pyöristäminen lähimpään lukuun arvosta x	
<code>intrz(x)</code>	Pyöristäminen nollaa kohti arvosta x	
<code>ln(x)</code>	Luonnollinen logaritmi arvosta x	
<code>lnp1(x)</code>	Luonnollinen logaritmi arvosta x+1	
<code>log(x)</code>	Kymmenkantainen logaritmi arvosta x	
<code>log2(x)</code>	2-kantainen logaritmi arvosta x	
<code>max(x,y)</code>	Maksimi arvoista x ja y	
<code>min(x,y)</code>	Minimi arvoista x ja y	
<code>mod(x,y)</code>	Jakojäännös funktiosta $x / y$ , jossa osamäärä pyöristetään alaspäin	
<code>pow(x,y)</code>	Luvun x korotus potenssiin y	$(x^y)$
<code>rand( )</code>	Satunnaisluvun generointi (liukuluku)	
<code>rem(x,y)</code>	Jakojäännös funktiosta $x / y$ , jossa osamäärä pyöristetään normaalisti	
<code>sec(x)</code>	Sekantti arvosta x	$(1/\cos(x))$
<code>sign(x)</code>	Arvon x etumerkki, palauttaa arvon 1, jos $x > 0$ , arvon 0, jos $x = 0$ ja arvon -1, jos $x < 0$	
<code>sin(x)</code>	Sini arvosta x	
<code>sinc(x)</code>	Sinc-funktio arvosta x	$(\sin(x)/x)$
<code>sinh(x)</code>	Hyperbolinen sini arvosta x	
<code>sqrt(x)</code>	Neliöjuuri arvosta x	
<code>tan(x)</code>	Tangentti arvosta x	
<code>tanh(x)</code>	Hyperbolinen tangentti arvosta x	



## Väyläasetustiedosto funktiogeneraattorille HP 33120A

### 33120A.ini

```
[Laitetyyppi]
Laiteryhmä=Funktiogeneraattori
Valmistaja=Hewlett-Packard
Laitetyyppi=33120A
```

```
[Yleiset]
Väylä=GPIOB
Versionumero=1.0
Pilkku pisteeksi=1
Piste pilkuksi=1
```

```
[GPIOB]
Osoite=10
Timeout=10000
Lopetusmerkki(kirjoitus)=0
Lopetusmerkki(luku)=0
Tavujen lukumäärä=24
```

```
[Sarja]
Osoite=2
Puskurin koko=0
Nopeus=9600
Data-bitit=8
Stop-bitit=0
Pariteetti=0
```

```
[LAN]
Osoite=192.168.0.1
Portti=80
Tavujen lukumäärä=12
```

```
[VXI]
Primääriosoitte=0
Sekundääriosoitte=0
Timeout=10000
Lopetusmerkki(kirjoitus)=0
Lopetusmerkki(luku) =0
Tavujen lukumäärä=12
```

```
[Laitteen asetukset]
Taajuus="FREQ "
Amplitudi="VOLT "
Offset="VOLT:OFFSET "
AM taajuus="AM:INT:FREQ "
AM syvyys="AM:DEPTH "
FM taajuus="FM:INT:FREQ "
FM deviaatio="FM:DEV "
Pursketaajuus="BM:INT:RATE "
Purskeluku="BM:NCYC "
```

```
[Tulosten luku]
Taajuus=FREQ?
Amplitudi=VOLT?
[Tuloksien yksiköt]
Taajuus=Hz
Amplitudi=V
```

```
[Makrot]
Reset=*CLS;*RST
Imp 50="OUTPUT:LOAD 50"
Imp high="OUTPUT:LOAD INF"
Sini="FUNCTION:SHAPE SIN;"
Kantti="FUNCTION:SHAPE SQU;"
Kolmio="FUNCTION:SHAPE TRI;"
Ramppi="FUNCTION:SHAPE RAMP;"
Kohina="FUNCTION:SHAPE NOISE;"
DC="FUNCTION:SHAPE DC;"
AM on="AM:STAT ON"
AM off="AM:STAT OFF"
FM on="FM:STAT ON"
FM off="FM:STAT OFF"
BM on="BM:STAT ON"
BM off="BM:STAT OFF"

[Yksiköt]
%=" "
```



## **Funktiogeneraattorin HP 33120A taajuusriippuvuusmittauksessa tarvittavat tiedostot**

### **33120A.ini**

```
[Mittaukset]
Taajuustarkkuus=counter
Lähtötason tarkkuus=dvm
Tasajännitteen tarkkuus=dvm
Lähtötason tarkkuus (high ohm)=dvm
Lähtötason tarkkuus (50 ohm)=dvm50
Lähtötason taajuusriippuvuus=8902
AM modulaatio=8902
```

### **Lähtötason taajuusriippuvuus.ini**

```
[Yleiset]
ohjekuva=""
ohjeteksti="Nollaa ja kalibroi mittavastaanotin. Kytke
mittavastaanottimen mittapää 11722A funktiogeneraattorin lähtöön."
```

```
[Ref.laitteet]
param1=33120A.ini
param2=8902A.ini
```

```
[Viive]
param1=1,000000
```

```
[Kal. tulostus]
param1=TRUE
param2=TRUE
param3=TRUE
param4=TRUE
param5=TRUE
```

```
[Save. tulostus]
param1=TRUE
param2=TRUE
param3=TRUE
param4=TRUE
param5=TRUE
```

```
[Riviarvo 1]
param1=Asetus
param2=Asetus
param3=Min
param4=Tulos
param5=Max
```

```
[Riviarvo 2]
param1=33120A
param2=8902A
param3=""
param4=8902A
param5=""
```

```
[Riviarvo 3]
param1=Taajuus
param2=Taajuus
param3=" "
param4=Jännite
param5=" "
```

```
[33120A.ini]
Lista0=Makro
Asetus0=Reset
Lista1=Makro
Asetus1="Imp 50"
Lista2=Amplitudi
Asetus2="3,0 Vrms"
```

```
[8902A.ini]
Lista0=Makro
Asetus0=Reset
Lista1=Makro
Asetus1="RF Power"
Lista2=Makro
Asetus2=V
```

**Lähtötason taajuusriippuvuus-pisteet.txt**

100 kHz	0,1 MHz	2,925 V	0,000 V	3,075 V
500 kHz	0,5 MHz	2,925 V	0,000 V	3,075 V
1 MHz	1 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
3 MHz	3 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
5 MHz	5 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
7 MHz	7 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
9 MHz	9 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
11 MHz	11 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
13 MHz	13 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V
15 MHz	15 MHz	2,910 V	0,000 V	3,090 V



## **Funktiogeneraattori HP 33120A:n kalibroinnin tuloksena syntynyt kalibrointitodistus**



# Nemko

## KALIBROINTITODISTUS

Päiväys: ESPOO 17.12.2002

Sivu: 1 ( 4 )

Liitteet                     

Numero:

**00001**

Kalibrointi pvm. 17.12.2002

Allekirjoitukset

\_\_\_\_\_  
Tapio Rautkari, kalibrointiasiantuntija

\_\_\_\_\_  
Tapio Heino, kalibrointipäällikkö

KALIBROITU LAITE: **Funktiogeneraattori**

VALMISTAJA: **Hewlett-Packard**

TYYPPI: **33120A**

SARJANUMERO: **1234A5678**

LAITENUMERO: **000**

ASIAKAS: **Malliyritys**

OSOITE: **Katuosoite 1, 00000 Kaupunki**

PUHELIN: **040-1234567**

HUOMAUTUS:

Kalibrointitulokset koskevat vain kalibroitua laitetta. Tämän todistuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain Nemko Product Services Oy:n antaman kirjallisen luvan perusteella.



## Yleistä

Mittaukset suoritettiin ilmastoidussa huoneessa, jossa lämpötila oli  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  ja suhteellinen kosteus  $38\% \pm 10\%$ . Verkkojännite oli  $230\text{ V} \pm 5\text{ V}$ . Mittauskohteet ja mittaustulokset on esitetty taulukoissa.

## Jäljitettävyys

Nemko Product Services Oy:n kalibrointitoiminta perustuu standardin EN ISO/IEC 17025 mukaisiin laatuvaatimuksiin. Kalibroinnissa käytetyt vertailulaitteet ovat kalibroitu Nemko Product Services Oy:n oman kalibrointijärjestelmän mukaisesti.

Taajuuden jäljitettävyys saadaan kansainvälisistä taajuusnormaaleista GPS-satelliittivastaanottimen avulla. Taajuuden referenssinormaalina on Cesium-atomitaajuusnormaali OSA 3210.

Pientaajuisten tehon ja tason jäljitettävyys saadaan kansallisesta mittanormaallaboratoriosta (MIKES Sähkö- ja aikametrologia) ja akkreditoidusta laboratoriosta (UKAS).

Suurtaajuisten tehon ja tason jäljitettävyys saadaan akkreditoidusta laboratoriosta (UKAS, DANAK).

Amplitudimodulaation jäljitettävyys saadaan akkreditoidusta laboratoriosta (DANAK).

Suureiden tasajännite, -virta, vaihtojännite, -virta ja resistanssi jäljitettävyys saadaan näiden suureiden kansallisesta mittanormaallaboratoriosta (MIKES Sähkö- ja aikametrologia).

## Laitteet

Nimi	Valmistaja	Tyyppi
Mittavastaanotin	Hewlett-Packard	8902A
Tarkkuusyleismittari	Hewlett-Packard	3458A
Taajuuslaskija	Hewlett-Packard	53132A

## Mittaustulokset

### Taajuustarkkuus

	Pursketaajuus	Purskeluku	Min	Mittaustulos	Max
Siniaalto			999,99 Hz	999,999 Hz	1000,01 Hz
Kanttiaalto	500 Hz	1	990 Hz	1000,139 Hz	1010 Hz

### Lähtötason tarkkuus

	Amplitudi	Taajuus	Min	Mittaustulos	Max
Sini	7,0 Vrms	1 kHz	6,930 V	6,992 V	7,070 V
Sini	5,7 Vrms	1 kHz	5,643 V	5,692 V	5,757 V
Kolmio	5,7 Vrms	100 Hz	5,643 V	5,694 V	5,757 V
Ramppi	5,7 Vrms	100 Hz	5,643 V	5,694 V	5,757 V
Kantti	10,0 Vrms	100 Hz	9,90 V	10,001 V	10,10 V
Kantti	8,0 Vrms	100 Hz	7,92 V	8,004 V	8,08 V

### Tasajännitteen tarkkuus

Offset	Min	Mittaustulos	Max
-10 V	-10,20 V	-9,988 V	-9,80 V
10 V	9,80 V	10,004 V	10,20 V

### Lähtötason tarkkuus (high ohm)

Amplitudi	Min	Mittaustulos	Max
7,0 Vrms	6,930 V	6,991 V	7,070 V
5,7 Vrms	5,643 V	5,692 V	5,757 V
5,5 Vrms	5,445 V	5,494 V	5,555 V
4,4 Vrms	4,356 V	4,395 V	4,444 V
3,5 Vrms	3,465 V	3,496 V	3,535 V
2,8 Vrms	2,772 V	2,797 V	2,828 V
2,2 Vrms	2,178 V	2,198 V	2,222 V
1,7 Vrms	1,683 V	1,698 V	1,717 V
1,4 Vrms	1,386 V	1,398 V	1,414 V
1,1 Vrms	1,089 V	1,099 V	1,111 V
0,88 Vrms	0,8712 V	0,8791 V	0,8888 V
0,70 Vrms	0,6930 V	0,6993 V	0,7070 V
0,55 Vrms	0,5445 V	0,5495 V	0,5555 V
0,44 Vrms	0,4356 V	0,4395 V	0,4444 V
0,35 Vrms	0,3465 V	0,3496 V	0,3535 V
0,28 Vrms	0,2772 V	0,2797 V	0,2828 V
0,22 Vrms	0,2178 V	0,2198 V	0,2222 V
0,17 Vrms	0,1683 V	0,1698 V	0,1717 V
0,14 Vrms	0,1386 V	0,1398 V	0,1414 V
0,11 Vrms	0,1089 V	0,1099 V	0,1111 V
0,088 Vrms	0,08712 V	0,08791 V	0,08888 V
0,070 Vrms	0,0693 V	0,06992 V	0,0707 V
0,055 Vrms	0,05445 V	0,05493 V	0,05555 V
0,044 Vrms	0,04356 V	0,04395 V	0,04444 V
0,036 Vrms	0,03564 V	0,03595 V	0,03636 V



**Lähtötason tarkkuus (50 ohm)**

Amplitudi	Min	Mittaustulos	Max
3,5 Vrms	3,465 V	3,493 V	3,535 V
2,8 Vrms	2,772 V	2,794 V	2,828 V
2,2 Vrms	2,178 V	2,196 V	2,222 V
1,7 Vrms	1,683 V	1,696 V	1,717 V
1,4 Vrms	1,386 V	1,397 V	1,414 V
1,1 Vrms	1,089 V	1,098 V	1,111 V
0,88 Vrms	0,8712 V	0,8784 V	0,8888 V
0,70 Vrms	0,6930 V	0,6988 V	0,7070 V
0,55 Vrms	0,5445 V	0,5490 V	0,5555 V
0,44 Vrms	0,4356 V	0,4392 V	0,4444 V
0,35 Vrms	0,3465 V	0,3494 V	0,3535 V
0,28 Vrms	0,2772 V	0,2795 V	0,2828 V
0,22 Vrms	0,2178 V	0,2196 V	0,2222 V
0,17 Vrms	0,1683 V	0,1697 V	0,1717 V
0,14 Vrms	0,1386 V	0,1398 V	0,1414 V
0,11 Vrms	0,1089 V	0,1098 V	0,1111 V
0,088 Vrms	0,08712 V	0,08785 V	0,08888 V
0,070 Vrms	0,0693 V	0,06989 V	0,0707 V
0,055 Vrms	0,05445 V	0,05491 V	0,05555 V
0,044 Vrms	0,04356 V	0,04393 V	0,04444 V
0,035 Vrms	0,03465 V	0,03494 V	0,03535 V
0,028 Vrms	0,02772 V	0,02795 V	0,02828 V
0,022 Vrms	0,02178 V	0,02196 V	0,02222 V
0,018 Vrms	0,01782 V	0,01796 V	0,01818 V

**Lähtötason taajuusriippuvuus**

Taajuus	Taajuus	Min	Mittaustulos	Max
100 kHz	0,1 MHz	2,925 V	2,979 V	3,075 V
500 kHz	0,5 MHz	2,925 V	2,979 V	3,075 V
1 MHz	1 MHz	2,910 V	2,977 V	3,090 V
3 MHz	3 MHz	2,910 V	2,976 V	3,090 V
5 MHz	5 MHz	2,910 V	2,980 V	3,090 V
7 MHz	7 MHz	2,910 V	2,980 V	3,090 V
9 MHz	9 MHz	2,910 V	2,979 V	3,090 V
11 MHz	11 MHz	2,910 V	2,984 V	3,090 V
13 MHz	13 MHz	2,910 V	2,992 V	3,090 V
15 MHz	15 MHz	2,910 V	2,999 V	3,090 V

**AM modulaatio**

AM taajuus	AM syvyys	Mittaustulos
100 Hz	10 %	9,9 %
100 Hz	50 %	50,3 %
100 Hz	90 %	90,6 %